

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Dlouhodobé měření parametrů
pasivních optických členů
vystavených radiačním vlivům**

**Long-term Measurement of the
Passive Optical Components
Parameters Exposed to Radiation
Effects**

Bakalářská práce byla vypracována v rámci projektů: „ BroadbandLIGHT – úloha veřejného osvětlení ve SMART CITY II Optovláknové senzorické systémy “, reg. č.: SP2021/107 a SP2021/45 Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky. Rovněž měření byla realizována skrze projekt nesoucí název Vývoj metody zrychleného stárnutí pasivních fotonických komponent se zaměřením na provozy se zvýšeným výskytem ionizujícího záření, reg. č.: TK01020162. Rád bych na tomto místě dále poděkoval panu Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za jeho podporu a odborné vedení při realizaci této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Lukášovi Hájkovi za jeho vstřícnost a odbornou pomoc při vytváření praktické části této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat vliv teplotního a radiačního stárnutí na pasivní optické komponenty. Pro urychlení procesu stárnutí bylo použito gama záření. Vliv stárnutí je zkoumán na optických děličích, které byly tomuto záření vystaveny. Práce je zaměřena na změny přenosových parametrů optických děličů před, během a dlouhodobě po ozáření. Tato práce vychází z předpokladu nárůstu útlumu při ozařování a jeho následného poklesu při relaxaci materiálu optického vlákna.

Klíčová slova: pasivní fotonické komponenty, optický dělič, vložný útlum, gama záření, splitter

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to investigate the effects of thermal and radiation ageing on passive optical components. Gamma radiation is used to accelerate the time degradation process. The effects of ageing were observed on optical splitters that were exposed to this irradiation. This thesis focuses on changes in transmission parameters of optical splitters before, during and long after exposure to irradiation. The whole investigation is based on the assumption of an increased attenuation during irradiation and its subsequent decrease during the relaxation of the optical fibre material.

Keywords: passive photonic components, optical coupler, insertion loss, gamma irradiation, splitter

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých zkratk a symbolů | 8 |
| Seznam obrázků | 9 |
| Seznam tabulek | 11 |
| 1 Úvod | 12 |
| 2 Pasivní komponenty optické sítě | 13 |
| 2.1 Atenuátor | 13 |
| 2.2 Konektor | 14 |
| 2.3 Izolátor | 15 |
| 2.4 Vlnový multiplex WDM | 16 |
| 2.5 Cirkulátor | 17 |
| 3 Optický dělič | 19 |
| 3.1 Výrobní procesy | 19 |
| 3.2 Měření útlumu | 21 |
| 3.3 Parametry optických děličů | 21 |
| 3.4 Testované optické děliče | 24 |
| 4 Metody měření útlumu | 26 |
| 4.1 Přímé metody měření útlumu | 26 |
| 4.2 Nepřímé metody měření útlumu | 29 |
| 5 Postup měření útlumu optických děličů | 31 |
| 5.1 Měření přenosových vlastností | 31 |
| 6 Popis ozařování optických děličů gama zářením | 33 |
| 6.1 Termín 1. - 4. 7. 2019 | 34 |
| 6.2 Termín 23. - 26. 9. 2019 | 35 |
| 7 Aktuální stav výzkumu gama záření na proces stárnutí pasivních fotonických komponent | 36 |
| 8 Vliv gama záření na přenosové vlastnosti optických děličů | 38 |
| 8.1 Vliv záření na vazební poměr | 38 |
| 8.2 Vliv záření na celkové ztráty | 42 |
| 8.3 Vliv záření na vložné ztráty | 46 |
| 8.4 Vliv záření na homogenitu | 49 |

| | | |
|----------|------------------------------------|-----------|
| 8.5 | Vliv záření na směrovost | 51 |
| 8.6 | Zhodnocení měření | 55 |
| 9 | Závěr | 58 |
| | Literatura | 60 |
| | Přílohy | 61 |
| A | Seznam příloh | 62 |

Seznam použitých zkratek a symbolů

| | |
|------|--|
| APC | – Úhlový fyzický kontakt (Angled Physical Contact) |
| BER | – Bitová chybovost (Bit Error Rate) |
| CWDM | – Coarse Wavelength Division Multiplex |
| DFB | – Distributed FeedBack laser |
| DWDM | – Dense Wavelength Division Multiplex |
| EDFA | – Erbium Doped Fiber Amplifier |
| FBT | – Fused Biconical Taper |
| FWHM | – Full Width at Half Maximum |
| FC | – Rovný kontakt (Flat Contact) |
| FTTx | – Optická přístupová síť (Fiber To The x) |
| LAN | – Lokální síť (Local Area Network) |
| MFD | – Mode Field Diameter |
| OTDR | – Optical Time-Domain Reflectometry |
| PC | – Fyzický kontakt (Physucal Contact) |
| PDL | – Polarizačně závislé ztráty (Polarization Dependent Loss) |
| PLC | – Planar Lightwave Cuircuit |
| PON | – Pasovní otická síť (Passive Optical Network) |
| RS | – Radiační stárnutí |
| TS | – Teplotní stárnutí |
| WDM | – Wave Division Multiplexing |
| WWDM | – Wavelength Division Multiplex |

Seznam obrázků

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Schéma variabilního atenuátoru [18]. | 14 |
| 2 | Rozdíl mezi PC a APC ferulí [6]. | 14 |
| 3 | Konektory typu FC (vlevo) a SC (vpravo). | 15 |
| 4 | Schéma činnosti optického izolátoru. | 16 |
| 5 | Schéma optické trasy s WDM. | 17 |
| 6 | Princip činnosti čtyř portového cirkulátoru. | 18 |
| 7 | Optický dělič 1:4 | 19 |
| 8 | Proces tavení vláken. | 20 |
| 9 | PLC dělič. | 20 |
| 10 | Celkové ztráty. | 22 |
| 11 | Vložné ztráty. | 23 |
| 12 | Směrovost. | 23 |
| 13 | Homogenita ztrát. | 24 |
| 14 | Optický dělič | 24 |
| 15 | Postup měření pasivních součástek metodou dvou délek [2][6]. | 27 |
| 16 | Schéma zapojení pro měření výkonu P_1 metodou vložných ztrát. | 28 |
| 17 | Metoda vložných ztrát A1. | 28 |
| 18 | Metoda vložných ztrát A2. | 28 |
| 19 | Metoda vložných ztrát A3. | 29 |
| 20 | Reflektometr OTDR. | 30 |
| 21 | Měření výkonu s použitím stínící krabičky. | 32 |
| 22 | Rozklad ^{60}Co na ^{60}Ni | 33 |
| 23 | Kobaltové ozařovače Prazdroj (vlevo) a Roza (vpravo). | 34 |
| 24 | Pohled do ozařovací šachty s nainstalovaným termoboxem. | 35 |
| 25 | Ferule vystavená gama záření. | 38 |
| 26 | Naměřený vazební poměr děliče 10. | 39 |
| 27 | Naměřený vazební poměr na nepracovní (1310 nm) a pracovní (1550 nm) vlnové délce děliče 12. | 40 |
| 28 | Naměřený vazební poměr na pracovní vlnové délce děliče 8. | 41 |
| 29 | Naměřený vazební poměr na nepracovní vlnové délce děliče 8. | 42 |
| 30 | Naměřené celkové ztráty děliče 8. | 43 |
| 31 | Celkové ztráty děliče 5 pro pracovní (1550nm) a nepracovní (1310nm) vlnovou délku. | 44 |
| 32 | Celkové ztráty děličů 1:4. | 45 |
| 33 | Celkové ztráty děličů 1:4. | 45 |
| 34 | Vložné ztráty děliče 1. | 46 |
| 35 | Odchylna měření vložných ztrát mezi výstupními větvemi pro dělič 1. | 47 |

| | | |
|----|---|----|
| 36 | Naměřené vložné ztráty děliče 11 pro vlnovou délku 1310 nm. | 47 |
| 37 | Vložné ztráty ve směru slučování děliče 11. | 48 |
| 38 | Naměřené hodnoty homogenity děliče 4. | 49 |
| 39 | Naměřené hodnoty homogenity děliče 2. | 50 |
| 40 | Naměřené hodnoty homogenity ve směru slučování děliče 14. | 51 |
| 41 | Naměřené hodnoty směrovosti pro dělič 14. | 52 |
| 42 | Naměřené hodnoty směrovosti pro děliče 9, 11, 12, 13, 15, a 16. | 52 |
| 43 | Srovnání hodnoty směrovosti děličů s dělicím poměrem 1:4. | 54 |
| 44 | Odchylka jednotlivých hodnot směrovosti pro dělič 1. | 55 |

Seznam tabulek

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Testované optické děliče termín 1. - 4. 7. 2019. | 25 |
| 2 | Testované optické děliče termín 23. - 26. 9. 2019. | 25 |
| 3 | Příklad naměřených hodnot děliče 4. | 31 |
| 4 | Naměřené hodnoty vazebního poměru použité v grafech 26 a 27. | 40 |
| 5 | Naměřené hodnoty vazebního poměru pro grafy 28 a 29. | 42 |
| 6 | Naměřené hodnoty celkových ztrát pro grafy 30 a 31. | 44 |
| 7 | Naměřené hodnoty celkových ztrát pro grafy 32 a 33. | 45 |
| 8 | Naměřené hodnoty vložných ztrát pro graf 34. | 46 |
| 9 | Naměřené hodnoty vložných ztrát ztrát pro graf 36. | 48 |
| 10 | Naměřené hodnoty vložných ztrát ztrát ve směru slučování pro graf 37. | 48 |
| 11 | Naměřené hodnoty homogenity pro grafy 38 a 39. | 50 |
| 12 | Naměřené hodnoty homogenity pro graf 40. | 51 |
| 13 | Naměřené hodnoty směrovosti pro grafy 41 a 42. | 53 |
| 14 | Vypočtené hodnoty průměrné směrovosti pro graf 43. | 54 |

1 Úvod

Proces stárnutí optických prvků je velkou neznámou. Urychlené stárnutí je hlavně způsobeno mnohonásobným zvýšením optického výkonu, zvýšením počtu kanálů v jednom optickém vlákne a celkovým zvýšením provozu v optických sítích. Další významné vlivy, které urychlují proces stárnutí, jsou vysoká teplota a gama záření. Zkoumání procesu stárnutí má významný vliv pro nalezení modelu umožňujícího předpovídat časový průběh a vývoj přenosových parametrů optických prvků.

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat vliv teplotního a radiačního stárnutí na pasivní optické komponenty. Pro urychlení procesu stárnutí bylo použito gama záření Cobalt-60. Tato práce se zaměřuje na optické děliče a jejich přenosové parametry. Tyto přenosové parametry lze definovat jako vazební poměr, vložné ztráty, celkové ztráty, homogenitu ztrát a útlum přeslechu mezi jednotlivými výstupními větvemi, neboli směrovost. Celkem bylo testováno šestnáct optických děličů, z toho deset s dělicím poměrem 1:2 a šest 1:4. Děliče byly dále rozděleny do čtyř skupin, které byly vystaveny různé intenzitě záření a teplotě. Pro testování byly zvoleny děliče, které byly vyrobeny technologií FBT a PLC. Přenosové parametry byly měřeny před, při a po ozáření. Měření parametrů optických děličů bylo prováděno každý měsíc po ozáření. Tato měření byla uskutečněna za účelem zjištění, jestli dochází k trvalému poškození optických děličů po ozáření.

Nakonec tato práce obsahuje zhodnocení naměřených výsledků a porovnání s výsledky vědeckých prací na toto téma.

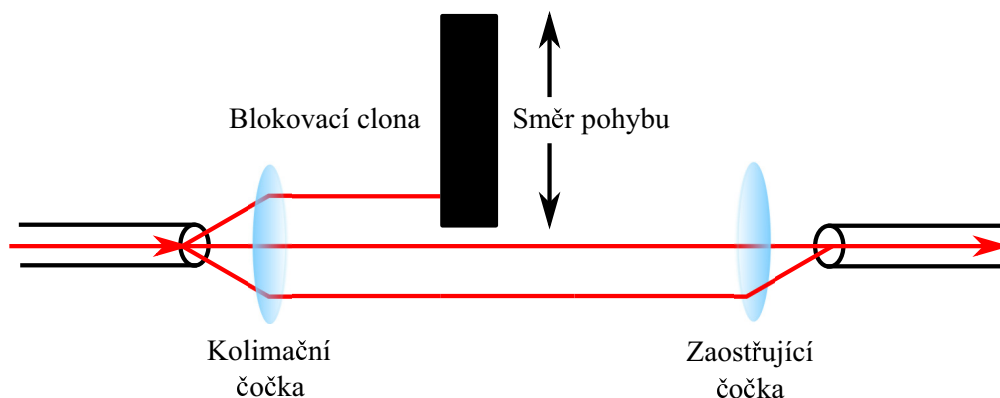
2 Pasivní komponenty optické sítě

Za pasivní komponenty optické sítě považujeme takové komponenty, které jsou svojí povahou čistě pasivní. To znamená, že po přidání do optické trasy, jsou zcela soběstačné a nepotřebují žádné napájení. Tyto komponenty zastávají důležitou roli v mnoha telekomunikačních aplikacích a vykonávají mnoho funkcí, například modulace, rozdělování a slučování signálů, filtrování a podobně. Obvykle se tyto funkce provádí tak, že se vyváže světlo z vlákna ven, provedou se různé úpravy podle potřeby a světlo se naváže zpět do vlákna. Tímto způsobem pracují aktivní komponenty optické sítě. Tento způsob má nevýhodu v tom, že při přerušení optického paprsku a vyvázání světla z vlákna dochází k velkému nárůstu ztrát, problémům se stabilitou, zvětšením součástek a k dalším negativním vlivům. Pro odstranění těchto negativních vlivů se používají pasivní optické komponenty. Pasivní optické komponenty jsou vyráběny tak, aby byly co nejlépe slučitelné s optickými vlákny a tak byly snadno zakomponovatelné do optických tras a nedocházelo k nárůstu útlumu a ostatním ztrátám. V dnešní době se vyrábí nejrůznější druhy optických komponentů, které se používají v nejrůznějších aplikacích. Nejzákladnější prvky jsou například děliče/slučovače (splitters/couplers), izolátory, WDM členy, cirkulátory, polarizátory, prvky k posunu fáze nebo frekvence a spousta dalších.

2.1 Atenuátor

Používá se jako optický útlumový článek. Je to prvek, který dokáže předem definovaným způsobem snížit úroveň výkonu optického signálu bez vlivu na jeho spektrum nebo tvar. Používají se například mezi dvěma aktivními prvky, kterým může příliš silný optický signál způsobit saturaci a v některých případech i poškození přijímače. Ke zvýšení útlumu se využívá například principu absorpce, odrazu, nebo rozptylu optického paprsku. Všechny tyto metody mají své výhody a nevýhody dané, například závislosti na vlnové délce nebo rozložení vidů. Optické útlumové články se vyrábějí v různých provedeních, nejčastěji v podobě optických spojek.

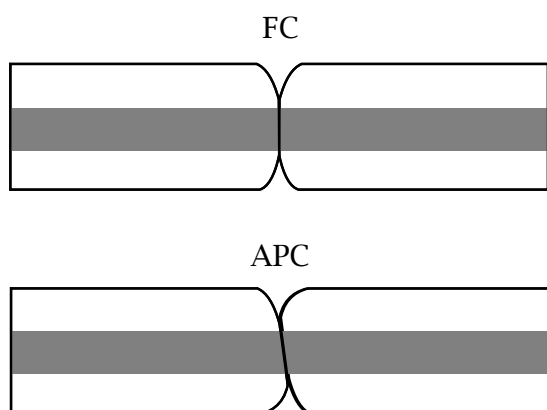
Dále se rozdělují do dvou skupin podle toho, jestli útlum atenuátoru je fixní anebo proměnlivý. Fixní atenuátory slouží především jako kalibry optického útlumu s konstantní hodnotou útlumu, která se pohybuje od 1 do 25 dB. Většinou se instalují přímo do optické trasy tam, kde je nutno zeslabit signál. Proměnné atenuátory umožňují plynulým nebo skokovým způsobem měnit útlum na optické trase. Tyto útlumové články mohou být buď manuálně anebo elektronicky řízené. Variabilní atenuátory jsou obvykle tvořeny blokovací součástkou, která je mezi vstupem a výstupem. Její poloha určuje hodnotu útlumu optického výkonu. Manuální útlumové články jsou ovládány šroubkem, který ovládá polohu blokovací clony. Elektricky ovládané atenuátory k pohybu blokovací clony používají krokovací motor, ovládaný řídicím napětím. Při použití v optických sítích jsou výhodnější než manuálně ovládané, protože nabízejí přesnější ovládání útlumu. Tyto variabilní atenuátory mohou být použity ve spolupráci s fotodetektořem, za účelem udržení optického výkonu na konstantní hodnotě, a to beze změn proudového napětí na laserové diodě [2].



Obrázek 1: Schéma variabilního attenuátoru [18].

2.2 Konektor

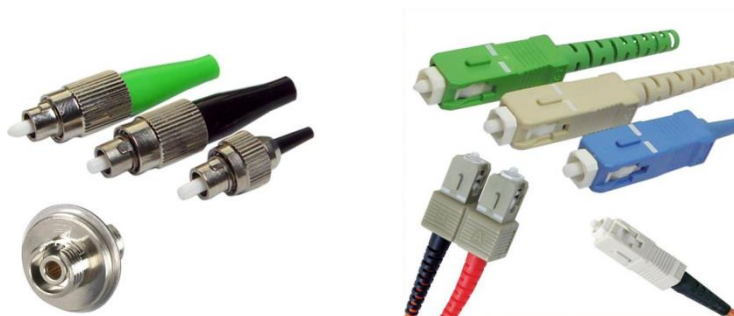
Jedná se o nejvýznamnější pasivní optickou součástku. Jsou používány jako zakončení optického vlákna nebo mohou být součástí jiných optických prvků. Slouží k pevnému uchycení optického vlákna a zároveň brání jeho poškození. Samotné tělo konektoru je většinou vyrobeno z kovu, anebo plastu. Správné uchycení a ochranu samotného vlákna zajišťuje ferule, která je většinou keramická nebo plastová. Nicméně může být vyrobena i z kovu a skla. Ferule může být zbrusena buď příčně s úhlem 0° , což je označováno jako PC. Tělo PC konektoru má typicky modrou barvu. Dále může být ferule příčně zaříznuta pod úhlem 8° , což je označováno jako APC. Tělo APC konektoru má převážně zelenou barvu. Konektory se stejným tělem, ale různým typem ferule nelze propojovat. Při takovém spojení dochází k trvalému poškození nebo dokonce zničení obou ferulí a tím pádem i konektorů. Konektor dále obsahuje aretační a zajišťovací prvek. Aretační prvek slouží ke správné orientaci konektoru při zapojování a zamezuje otáčení ve spojení. Zajišťovací prvek má za úkol zamezit samovolnému vysunutí optického konektoru.



Obrázek 2: Rozdíl mezi PC a APC ferulí [6].

Vzhledem k četnosti jejich použití může kvalita optických konektorů výrazně ovlivnit parametry celé optické trasy. Optické konektory jsou charakterizovány dvěma parametry, vložnými ztrátami a útlumem zpětného odrazu. Útlum optického konektoru vyjadřuje ztráty optického výkonu způsobené zapojením konektoru do optické trasy. Příčina těchto ztrát může být, například v nedokonalém opracování konců konektorových vláken, v nedostatečném vyčištění a v nedokonalosti jednotlivých mechanických dílků konektoru. Maximální přípustná hodnota pro útlum optického konektoru je 0,75 dB. Mezi nejpoužívanější těla konektorů patří například FC, SC a ST. FC konektory jsou vhodné například pro trvalejší spojení a náročnější aplikace, z důvodu jejich odolnosti proti vibracím. SC konektory jsou vhodné pro přístupové sítě, protože se snadno a rychle připojují.

Konektory jsou obecně poměrně levné a rychle rozebíratelné spoje, za cenu vyššího vložného útlumu. Kvalitu spoje můžou výrazně degradovat nečistoty na ferulí, které se čistí za pomoci mikroskopu, isopropyl alkoholu a čistících ubrousků. Aby se zabránilo znečištění či poškození nebo poškrábání vlákna, chráníme nepoužívané konektory krytkami, které aplikujeme bezprostředně po rozebrání spoje. Pokud nedojde k fyzickému kontaktu ferulí, vzniká mezi nimi vzduchová mezera, která vede ke zvýšení vložného útlumu. Do důležitých spojů se může tedy aplikovat takzvaný imerzní gel. Index lomu tohoto gelu se přibližuje k hodnotě indexu lomu jádra vlákna, což má příznivé účinky na kvalitu spoje [2][6].

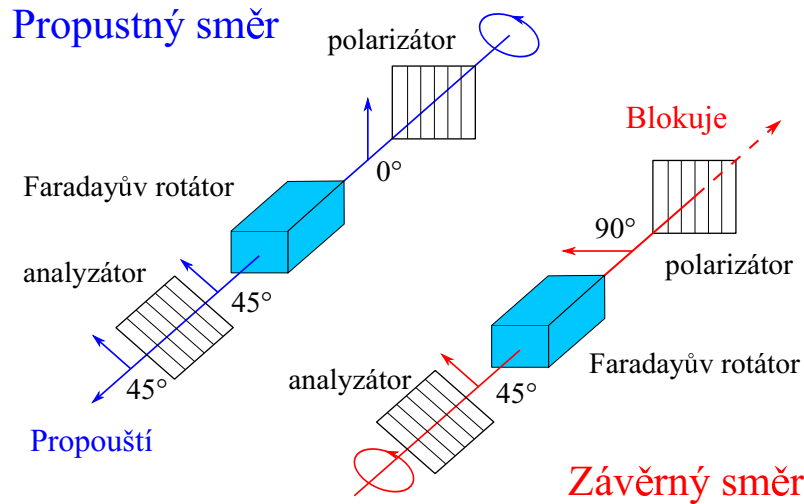


Obrázek 3: Konektory typu FC (vlevo) a SC (vpravo).

2.3 Izolátor

Je optická součástka, která umožňuje průchod světla pouze v jednom směru. Slouží například pro ochranu laseru před odrazy od nehomogenit optické trasy. Optický izolátor má dva výstupy a s minimálními ztrátami propouští signál a maximálně tlumí zpětné odrazy výkonu. Optické izolátory jsou realizované především na principu využití magnetooptického jevu stáčení roviny polarizace optického záření procházejícího mezi polarizátorem a analyzátorem. Světlo putující propustným směrem nejprve projde vstupním polarizátorem a je následně vertikálně polarizováno. Faradayův rotátor polarizuje světlo o 45° . Takto polarizované světlo prochází analyzátorem a je navázáno zpět do vlákna. Světlo přivedené do izolátoru, v závěrném směru, se nejprve analyzátorem polarizuje o 45° . Faradayův rotátor otočí polarizace o 45° . To znamená, že světlo je

polarizováno horizontálně. Protože je polarizátor orientovaný vertikálně je světelný paprsek utlumen. Nejdůležitější parametry optických izolátorů jsou vložné ztráty, izolace a útlum zpětného odrazu[2].



Obrázek 4: Schéma činnosti optického izolátoru.

2.4 Vlnový multiplex WDM

Představuje v optických sítích technologii, kterou se při přenosu multiplexuje více optických kanálů v jednom optickém vlákně s použitím rozdílných vlnových délek. To umožňuje rozšířit kapacitu přenosového média nebo provést obousměrnou komunikaci na jednom optickém vlákně. Každá vlnová délka představuje jeden samostatný přenosový kanál. Například při přenosu s rychlostí 2,5 Gbit/s na čtyřech vlnových délkách narůstá přenosová kapacita sítě na hodnotu 10 Gbit/s. Pro realizaci této sítě je zapotřebí použít multiplexory a demultiplexory WDM (Wavelength Division Multiplexing).

WDM technologie se dále dělí na WWDM, DWDM a CWDM. WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex), technologie širokého vlnového multiplexu, patří mezi starší techniky, přesto je dodnes občas používána, protože je cenově dostupnější než DWDM nebo CWDM. Nejčastěji se používají pouze čtyři vlnové délky v oblasti 850 nm pro vícevidová vlákna a v oblasti 1310 nm pro jednovidová. WWDM se nejčastěji používá pro přenos Gbit a 10Gbit Ethernetu.

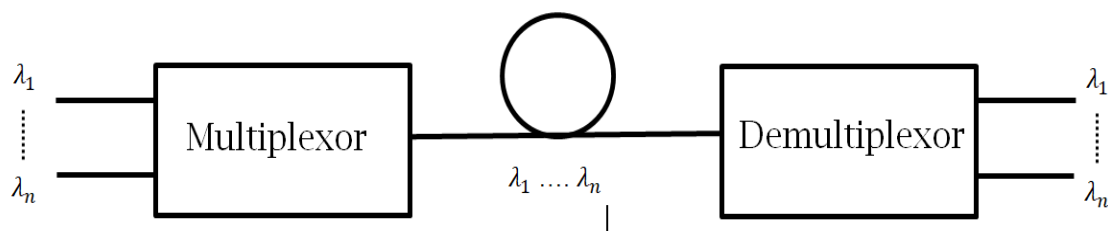
Technologie hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) patří mezi nejdokonalější systémy, které se v optoelektronice používají. Odstup jednotlivých kanálů je pouze 0,8 nm. Díky tak malému odstupu mezi kanály může být v jednom optickém vlákně až několik desítek kanálů. To umožňuje razantní zvýšení přenosové kapacity optického spoje. Dnešní systémy umožňují přenést 2,5 až 10 Gbit/s v jednom optickém kanále a provozovat souběžně až 96 těchto kanálů na jednom optickém vlákně. Nástup této technologie byl umožněn zejména díky laserům DFB (Distributed FeedBack laser) s extrémně úzkou spektrální čarou, dále EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovači a vysoce selektivními spektrálními filtry.

Tato zařízení jsou velice citlivá na kmitočtovou a teplotní stabilitu. To je jedním z důvodů, proč je tato technologie velice nákladná [10].

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex), takzvaný hrubý multiplex, vznikl jako levnější varianta DWDM. Jeho technické řešení není tak složité a použité komponenty nepotřebují tak přesné a technologicky náročné prvky. Odstup jednotlivých kanálů je podstatně větší. Z tohoto důvodu mohou být použity jako zdroje záření obyčejné laserové diody bez nároku na chlazení. Jednotlivé vlnové délky byly také zvoleny tak, aby byly kompatibilní s běžně používanými vlnovými délkami 1310 a 1550 nm.

2.4.1 Multiplexory a Demultiplexory

Multiplexory jsou jednou z hlavních součástí optické sítě. Jsou to pasivní zařízení, které mají za úkol sloučit několik optických signálů do jednoho výsledného signálu. Ten je pak dále přenášen po optickém vlákně až k demultiplexoru, kde je tento signál zase rozdělen na více signálů. Demultiplexor je poněkud složitější zařízení než multiplexor. Má za úkol rozdělit několik vlnových délek přicházejících po jednom vlákně do několika vláken. Oddělení různých vlnových délek lze realizovat za pomoci disperzního elementu, jako například difrakční mřížky, hranolu nebo optického filtru. Charakteristické parametry pro vlnový multiplexor nebo demultiplexor jsou vložné ztráty a útlum zpětného odrazu, přičemž je velmi důležitá jejich spektrální závislost. Kromě toho se objevila i řada dalších nových parametrů, jako je například šířka pásma, odstup kanálů nebo přeslech mezi jednotlivými spektrálními kanály. Je třeba brát v úvahu, že při nasazení systému s vlnovým multiplexem se objeví celá řada nových spektrálních měření [2].

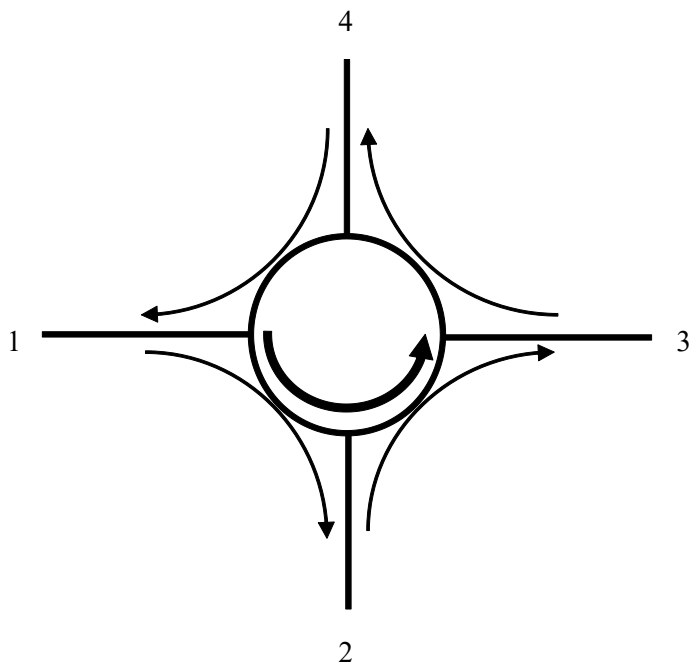


Obrázek 5: Schéma optické trasy s WDM.

2.5 Cirkulátor

Optický cirkulátor je pasivní optická součástka, která umí rozdělit nebo sloučit signál na stejné vlnové délce. Cirkulátory mohou mít tři a více portů. Princip optického cirkulátoru spočívá v přenosu optického signálu mezi jednotlivými porty. Ve směru cirkulace se optický signál šíří jen s malými ztrátami na první výstup. Optický signál, který přichází na vstupní port cirkulátoru je směřován na druhý port. Dále pak optický signál, který přijde na druhý port je směřován na třetí port. Stejný postup následuje i u dalších portů. Z toho vyplývá, že pokud se zařízení

odrazí, je přeneseno do následujícího portu a nikoli zpět. Běžné ztráty v propustném směru jsou 0,5 až 1,5 dB, v závěrném směru větší než 50 dB. Optický cirkulátor může sloužit jako alternativa optického děliče. Mezi hlavní výhody optického cirkulátoru patří nízké vložné ztráty, vysoká izolace a nízké hodnoty PDL (Polarization Dependent Loss). Nejdůležitějšími parametry optických cirkulátorů jsou opět vložné ztráty a útlum zpětného odrazu.



Obrázek 6: Princip činnosti čtyř portového cirkulátoru.

3 Optický dělič

Optický dělič je pasivní součástka optické sítě. Když je světelný signál přenášén nemůže se světelná energie zcela soustředit v jádru vlákna. Malé množství energie pronikne přes plášť vlákna. Pokud jsou dvě vlákna dostatečně blízko sebe, může procházející světlo v optickém vlákne vstoupit do jiného optického vlákna. To umožňuje rozdělení světla z jednoho optického vlákna do několika vláken v určitém vazebním poměru. Tím umožňuje přístup k optické síti většímu počtu uživatelů současně. Většina děličů jsou obousměrné komponenty, mohou slučovat i rozdělovat. Pokud slouží ke spojení několika vláken do jednoho, jedná se o slučovač.

Optické děliče se využívají jako pasivní komponenty v pasivních optických sítích PON, lokálních sítích LAN, FTTX a ostatních distribučních optických sítích.



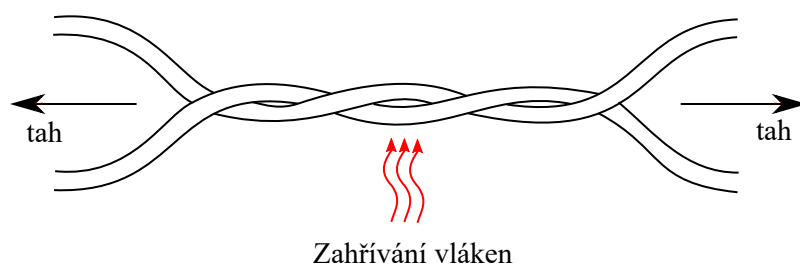
Obrázek 7: Optický dělič 1:4

3.1 Výrobní procesy

V současnosti se nejčastěji používají 2 druhy výrobních procesů optických děličů, FBT technologie tavení vláken a PLC planární technologie.

3.1.1 FBT

První z výrobních technologií je FBT (Fused Biconical Taper). Jedná se o starší a levnější technologii. Tyto děliče se řadí mezi základní a slouží pro jednoduché dělení optických signálů. Vyrábí se spojováním optických vláken. Toto spojování je prováděno pod velkým tlakem a teplotou, kdy se jednotlivá vlákna spolu svaří a jádra se dostanou velice blízko sebe, díky čemu dochází k rozdělování a slučování optického signálu. Jsou spíše vyráběny pro menší počty portů maximálně 1:8. FBT děliče se nejčastěji využívají, tam kde nejsou vysoké nároky na stabilitu. Dále jsou levné a tento výrobní proces je relativně jednoduchý. Děliče mohou mít stejný nebo různý dělicí poměr a jsou přizpůsobeny pro určitou vlnovou délku. Své uplatnění najdou například v lokálních sítích, systémech kabelové televize CATV, vláknových senzorech, v telekomunikačních systémech na menší i velké vzdálenosti a také jako jednoduché WDM děliče.

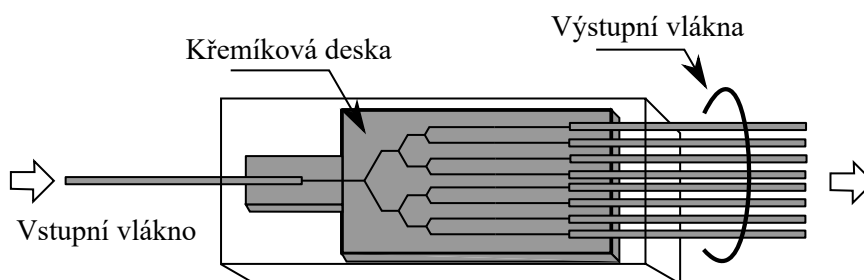


Obrázek 8: Proces tavení vláken.

Proces výroby probíhá tak, že se nejprve vlákna očistí a odstraní se jednotlivé ochrany. Takto připravená vlákna se zakroutí, tím se docílí přiblížení jednotlivých vláken. Následně je jedno vlákno připojeno na zdroj o požadované vlnové délce. Dále se všechna výstupní vlákna připojí na fotodetektor. Nyní se zakroucená vlákna mohou začít zahřívát. Při dosažení potřebné teploty se začnou natahovat. Natahováním se zmenšuje průměr jednotlivých vláken a zároveň se zmenšuje vzdálenost mezi jádry. Jakmile je dosaženo požadované vzdálenosti mezi jádry, může se optický výkon přesouvat z jednoho optického vlákna do druhého. Podle výstupních výkonů se hlídá vazební poměr jednotlivých vláken. Nakonec se nepotřebná vstupní vlákna odstraní a přidá se mechanická ochrana.

3.1.2 PLC

PLC (Planar Lightwave Circuit) jsou vyráběny planární technologií. PLC technologie je o něco složitější a modernější než FBT. Hlavní částí děliče je tzv. křemíková deska, ve které se postupně vytvoří požadovaná struktura, to umožní vyrobit dělič o požadovaném počtu portů od 1:2 až 1:128. PLC umožňuje konstrukci děličů s více porty bez razantního nárůstu velikosti děliče a jsou vhodnější pro použití na více vlnových délkách.



Obrázek 9: PLC dělič.

PLC děliče se vyrábí způsobem podobným výrobě polovodičů a to díky jeho hlavní části. Při výrobě se jako první vyrobí vlnovody na křemíkové desce a to v přesném počtu portů a

dělicím poměru. Po umístění vlnovodů se na ně nanese silikonový substrát. Nakonec je nutné ke křemíkové desce připojit vstupní a výstupní pole vláken. Do křemíkové desky se vyřežou drážky, do kterých se s velkou přesností vloží jádra jednotlivých optických vláken. Nakonec se křemíková deska zataví se vstupními i výstupními poli vláken a vznikne optický dělič, který se ještě pro lepší ochranu zataví do ochranného pouzdra. Takto vyrobený dělič může mít, díky této technologii, malé rozměry i přes velký počet výstupních portů [4].

3.2 Měření útlumu

Útlum optických děličů se doporučuje měřit metodou vložných ztrát. Tato metoda je rychlejší a její hlavní výhodou, oproti metodě dvou délek je, že není destruktivní. Nicméně tato metoda má odchylku měření okolo desetin dB. Měření touto metodou je dvoufázové. Jako první je třeba zjistit hodnotu vstupního výkonu. Vstupní výkon P_{IN} získáme propojením zdroje záření s detektorem. Je důležité, aby analyzované i referenční vlákno bylo stejného typu. Ve druhém kroku se zapojí měřený optický dělič mezi zdroj a detektor, čímž získáme hodnotu optického výkonu P_{OUT} . Metoda vložných ztrát poskytuje tři možnosti v nastavení reference.

3.3 Parametry optických děličů

Standardní optické děliče rozdělují nebo spojují světlo v závislosti na použité vlnové délce. Nejlépe pracují, pokud se vlnová délka nachází v provozním pásmu děliče. Důležité parametry standardních děličů jsou vazební poměr (coupling ratio), celkové ztráty (excess loss), vložné ztráty (insertion loss), směrovost (directivity), homogenita ztrát (uniformity), útlum zpětného odrazu (return loss), rozsah operační vlnové délky (operation wavelength range), polarizačně závislé ztráty (polarization dependent loss - PLD), izolace, spolehlivost a cena.

3.3.1 Dělicí poměr

Vyjadřuje počet vstupů k počtu výstupů děliče. U pasivních optických sítí se nejčastěji používají 1:2, 1:4, 1:8, 1:16, 1:32, 1:64. Optické děliče mohou mít jeden a více vstupů. Dělicí poměr pak může být například 2:2.

3.3.2 Vazební poměr (Coupling ratio)

Udává v jakém poměru se rozdělí/sloučí vstupní optický výkon. Je vyjádřen jako poměr jednoho výstupu k celkové sumě všech výstupů. Děliče se rozdělují na symetrické a asymetrické. Symetrické děliče rozdělí vstupní signál rovným dílem, zatímco asymetrické rozdělí vstupní signál v požadovaném poměru například 9:1. Vazební poměr se nejčastěji vyjadřuje v procentech, napří-

klad u symetrického děliče 1:2 se uvádí vazební poměr 50%. V praxi je velice nepravděpodobné, že se vstupní výkon rozdělí rovnoměrně mezi dva výstupy. Přijatelná chyba je mezi 1% a 5%,

$$CR = -10 \log \frac{P_{OUT1}(\lambda)}{\sum_{n=0}^i P_{OUT,n}(\lambda)} \text{ [dB]}, \quad (1)$$

$$CR = \frac{P_{OUT1}(\lambda)}{\sum_{n=0}^i P_{OUT,n}(\lambda)} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (2)$$

kde P_{OUT} představuje optický výkon na konkrétním výstupu, i je počet výstupních portů.

3.3.3 Celkové ztráty (Excess loss)

Tento parametr určuje ztráty samotného optického děliče. Udává poměr veškerého vstupního výkonu k veškerému výstupnímu výkonu. Vyjadřuje ztráty optického výkonu uvnitř děliče následkem absorpce a rozptylu záření při jeho průchodu děličem. Celkové ztráty jsou jedním z nejdůležitějších ukazatelů kvality děliče. V nejideálnějším případě by hodnota celkových ztrát měla být 0, ale této hodnoty nelze v praxi dosáhnout. Nejčastěji celkové ztráty nabývají hodnot do 1 dB [2].

$$EL(\lambda) = -10 \log \frac{\sum_{n=0}^i P_{OUT,n}(\lambda)}{P_{IN}(\lambda)} \text{ [dB]}, \quad (3)$$

kde P_{IN} představuje vstupní optický výkon, P_{OUT} výstupní optický výkon a i je počet výstupních portů.



Obrázek 10: Celkové ztráty.

3.3.4 Vložné ztráty (Insertion loss)

Vložné ztráty představují celkové ztráty výkonu mezi vstupním optickým výkonem a jedním konkrétním výstupem. Vložný útlum je způsoben rozdělením vstupního optického výkonu do několika větví. Z toho důvodu jsou vložné ztráty závislé na počtu výstupních portů a také na tom, jestli je dělič symetrický anebo asymetrický.

$$IL(\lambda) = -10 \log \frac{P_{OUT,i}(\lambda)}{P_{IN}(\lambda)} \text{ [dB]}, \quad (4)$$

kde $P_{OUT,i}$ je optický výkon na konkrétním výstupu a P_{IN} je vstupní optický výkon.



Obrázek 11: Vložné ztráty.

3.3.5 Směrovost (Directivity)

Tento parametr je taky někdy označován jako přeslech. Jedná se o útlum mezi jednotlivými výstupními porty a vyjadřuje míru izolace mezi výstupy děliče. Útlum by měl být co nejvyšší, protože je nežádoucí, aby se optický výkon přivedený na konkrétní výstup objevil i na jiném výstupu. Hodnota směrovosti se běžně pohybuje od 40-60 dB. Směrovost je měřena mezi všemi kombinacemi výstupů.

$$D(\lambda) = -10 \log \frac{P_{OUT,i}(\lambda)}{P_{IN}(\lambda)} \text{ [dB]}, \quad (5)$$

kde P_{IN} je vstupní výkon přivedený na výstup a $P_{OUT,i}$ je nežádoucí optický výkon na výstupu.



Obrázek 12: Směrovost.

3.3.6 Homogenita ztrát (Uniformity)

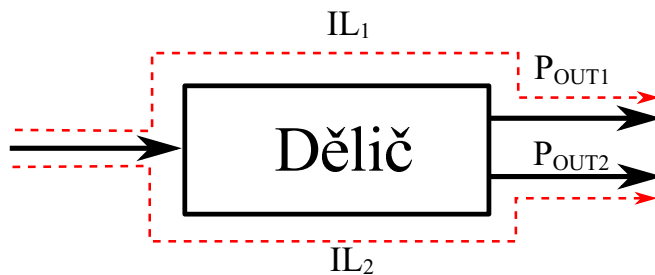
Vyjadřuje v decibelech rozdíl daného parametru na dvou výstupních portech například vložných ztrát. Tento parametr má především význam u symetrických 1:2 děličů. Tyto děliče mají na obou výstupních portech 3 dB útlum a rozdělují vstupní výkon na polovinu. Není možné, aby se vstupní výkon rozdělil přesně na polovinu. Homogenita ztrát popisuje tento rozdíl mezi výstupními optickými výkony. V ideálním případě jsou útlumy IL_1 a IL_2 stejné, tím získáme ideální dělič, který rovnoměrně rozdělil výkony. V případě že nejsou stejné, jedná se o nehomogenitu,

$$U = IL_{max} - IL_{min} \text{ [dB]}, \quad (6)$$

kde IL_{max} jsou maximální vložné ztráty a IL_{min} minimální vložné ztráty. Pro 1:2 děliče platí že,

$$U = -10 \log \frac{P_{OUT1}}{P_{IN}} - \left[-10 \log \frac{P_{OUT2}}{P_{IN}} \right] = 10 \log \frac{P_{OUT2}}{P_{OUT1}} \text{ [dB]}, \quad (7)$$

kde P_{IN} je vstupní optický výkon a P_{OUT1} , P_{OUT2} jsou jednotlivé výstupní výkony.



Obrázek 13: Homogenita ztrát.

3.4 Testované optické děliče

Testováno bylo celkem šestnáct optických děličů, z nichž byla polovina vyrobena technologií PLC a druhá polovina technologií FBT. Jedná se pouze o symetrické děliče s dělicím poměrem 1:2 a 1:4. Konkrétně bylo testováno deset děličů s dělicím poměrem 1:2 a šest 1:4. Dále všechny děliče používají jednomódové vlákno, konektor FC/APC a mají délku vláken 2 metry. Další parametry optických děličů jsou uvedeny v tabulce 1 a 2.



Obrázek 14: Optický dělič

Tabulka 1: Testované optické děliče termín 1. - 4. 7. 2019.

| Číslo | Produktové číslo | Sériové číslo | Vlnová délka | Dělicí poměr | Stárnutí |
|-------|------------------|----------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 1 | PLC104-DY21002 | FQC-DY21002 | 1260-1650 nm | 1:4 | 50 kGy při teplotě 20 °C |
| 2 | PLC104-DY21005 | FQC-DY21005 | 1260-1650 nm | 1:4 | 50 kGy při teplotě 20 °C |
| 3 | PLC102-DY21002 | FQC-DY21002 | 1260-1650 nm | 1:2 | 50 kGy při teplotě 20 °C |
| 4 | PLC102-DY21009 | FQC-DY21009 | 1260-1650 nm | 1:2 | 50 kGy při teplotě 20 °C |
| 5 | WBC-1x2-1550 | 2018111550001 | 1550 nm | 1:2 | 50 kGy při teplotě 60 °C |
| 6 | WBC-1x2-1310 | 2018111350001 | 1310 nm | 1:2 | 50 kGy při teplotě 60 °C |
| 7 | WBC-1x4-D-P-1550 | AC011811160018 | 1550 nm | 1:4 | 50 kGy při teplotě 60 °C |
| 8 | WBC-1x4-D-P-1310 | AC011811160003 | 1310 nm | 1:4 | 50 kGy při teplotě 60 °C |

Tabulka 2: Testované optické děliče termín 23. - 26. 9. 2019.

| Číslo | Produktové číslo | Sériové číslo | Vlnová délka | Dělicí poměr | Stárnutí |
|-------|------------------|---------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 9 | PLC102-DY21004 | FQC-DY21004 | 1260-1650 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 20 °C |
| 10 | PLC104-DY21006 | FQC-DY21006 | 1260-1650 nm | 1:4 | 60 kGy při teplotě 20 °C |
| 11 | WBC-1x2-1310 | 2018111350002 | 1310 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 20 °C |
| 12 | WBC-1x2-1550 | 2018111550003 | 1550 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 20 °C |
| 13 | PLC102-DY21005 | FQC-DY21005 | 1260-1650 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 60 °C |
| 14 | PLC104-DY21007 | FQC-DY21007 | 1260-1650 nm | 1:4 | 60 kGy při teplotě 60 °C |
| 15 | WBC-1x2-1310 | 2018111350003 | 1310 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 60 °C |
| 16 | WBC-1x2-1550 | 2018111550002 | 1550 nm | 1:2 | 60 kGy při teplotě 60 °C |

4 Metody měření útlumu

Měření útlumu pasivních optických prvků je specifikováno v normě ČSN EN 61300-3-4 ed. 2. Norma popisuje metody měření útlumu pasivních součástek vláknové optiky. Specifikuje dvě měřicí metody, a to přímou a nepřímou metodu.

Útlum daného prvku udává míru ztrát optického výkonu způsobeného jejich zapojením do optické trasy a vyjadřuje se v decibelech. Metody založené na přímém měření ztrát optického výkonu při průchodu měřenou součástkou, se nazývají transmisivní nebo přímé. Druhou skupinu tvoří metoda nepřímá, při které je za pomoci analýzy zpětného rozptylu vyhodnocována hodnota útlumu [7].

4.1 Přímé metody měření útlumu

Výstupem při měření přímou metodou je útlum prvku pro měřenou vlnovou délku. Základem přímých metod měření útlumu je zjistit ztrátu optického výkonu procházejícího měřenou součástkou. Měření probíhá ve dvou krocích, kdy nejprve změříme referenční výkon P_0 trasy bez měřeného prvku, ve druhém kroku pak provedeme měření se zařazením prvku do optické trasy. Tím získáme optický výkon P_1 . Útlum se následně vypočítá pomocí vzorce 8.

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_0}{P_1} [dB], \quad (8)$$

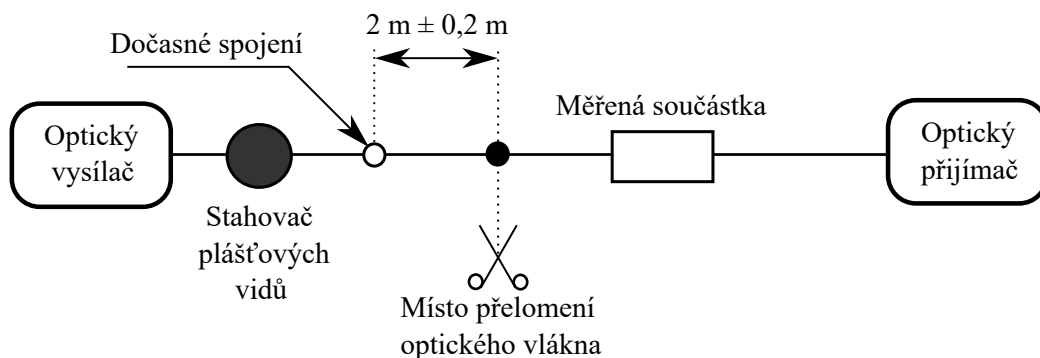
Podle způsobu získání referenční hodnoty výkonu P_0 a postupu při měření rozlišujeme tři varianty přímých metod.

- Metoda dvou délek.
- Metoda vložných ztrát.
- Metoda substituční.

4.1.1 Metoda dvou délek

Jedná se o nejpřesnější metodu měření útlumu. Je odvozena od základní definice útlumu. Ten je definován jako podíl dvou výkonů ve dvou bodech měřeného úseku. Největší výhodou této metody je vysoká přesnost, odchylky měření se pohybují v řádech setin decibelů. Mezi její nevýhody patří to, že je poměrně časově náročná a také, že je tato metoda destruktivní.

Schéma měření je naznačeno v obrázku níže. K měření útlumu na určité vlnové délce je zapotřebí zdroj světla, vidový filtr a detektor. Vidový filtr si lze představit jako vlákno o několika závitech namotaných na válec. Vlivem ohybu vlákna dochází ke změně rozložení energie ve vlákne, slabě vedené vidy, které by se vláknem šířily jen po omezenou vzdálenost, jsou takto vyvázány z jádra vlákna. Tím pádem nemají negativní vliv na přesnost měření [7].



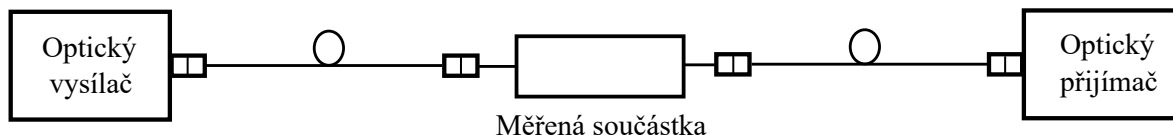
Obrázek 15: Postup měření pasivních součástek metodou dvou délek [2][6].

Postup měření je následující. Nejprve provedeme zapojení měřené součástky do měřicí aparatury. To nám umožní změřit výstupní výkon P_1 . Při druhém kroku se změří optický výkon P_0 . Toho docílíme tím že, přelomíme optické vlákno za vidovým filtrem a změříme vstupní výkon bez měřené součástky. Během tohoto kroku se nesmí změnit podmínky vazby, to znamená, že se nesmí porušit dočasné spojení soustavy se zdrojem záření. Z naměřených hodnot výkonu stanovíme pomocí vzorce 8 útlum součástky.

4.1.2 Metoda vložených ztrát

Metoda vložených ztrát se obecně používá pro pasivní součástky s integrovanými nebo připojenými konektory a její přesnost závisí na kvalitě těchto konektorů. Jedná se o rychlejší, ale méně přesnou metodu, její odchylka měření se pohybuje okolo desetin dB. Hlavní výhodou oproti metodě dvou délek je, že tato metoda není destruktivní. Měření touto metodou je většinou dvoustupňové. Nejprve se musí změřit referenční hodnota a až následně se změří hodnota výkonu trasy s měřenou součástkou. U této metody můžeme zvolit ze tří variant měření referenčního výkonu P_0 .

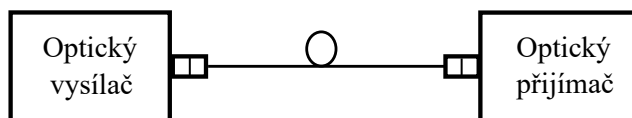
Postup měření je následující. Nejprve se propojí optický vysílač s přijímačem. Při tomto kroku dostaneme referenční hodnotu P_0 . Po získání reference se vazby rozpojí a do měřené soustavy se přidá měřená součástka dle schématu 16. Tento krok nám umožní naměřit hodnotu výkonu P_1 . Výpočet útlumu se provádí opět pomocí vzorce 8.



Obrázek 16: Schéma zapojení pro měření výkonu P_1 metodou vložných ztrát.

Tato metoda se může provádět i čtyřstupňově, to znamená, že oba přístroje jsou jak zdroj optického záření, tak měřiče optického výkonu. Nejprve se jeden z přístrojů nastaví jako zdroj a druhý přístroj jako měřič optického výkonu. Po změření trasy si tyto přístroje vymění role a měří se z druhé strany trasy. Tato moderní zařízení zkracují dobu potřebnou na proměření jedné součástky.

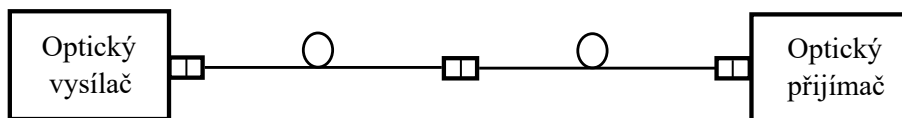
Jak již bylo zmíněno výše, jsou tři možnosti zvolení postupu při měření reference. Každá z těchto variant poskytuje různé výsledky na stejné trase. Měření výstupního výkonu P_1 probíhá samozřejmě vždy dle schématu 16. První z těchto variant je A1. Je to metoda s jedním měřicím spojovacím modulem. Nastavení této metody je znázorněno na obrázku 17.



Obrázek 17: Metoda vložných ztrát A1.

A1 poskytuje výsledek měření útlumu pasivního optického prvku, včetně vložných ztrát obou optických konektorů.

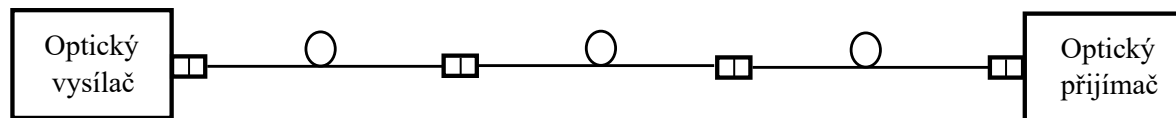
Druhá možnost nastavení reference se nazývá A2. Jedná se o metodu se dvěma měřicími spojovacími moduly.



Obrázek 18: Metoda vložných ztrát A2.

Při použití této varianty nastavení reference dostaneme výsledek útlumu součástky a vložný útlum jednoho konektoru.

Třetí a poslední metoda nastavení reference při měření metodou vložných ztrát je A3. Při této metodě se používají tři měřicí spojovací moduly.



Obrázek 19: Metoda vložných ztrát A3.

V tomto případě je výsledek měření pouze útlum měřeného optického prvku.

4.2 Nepřímé metody měření útlumu

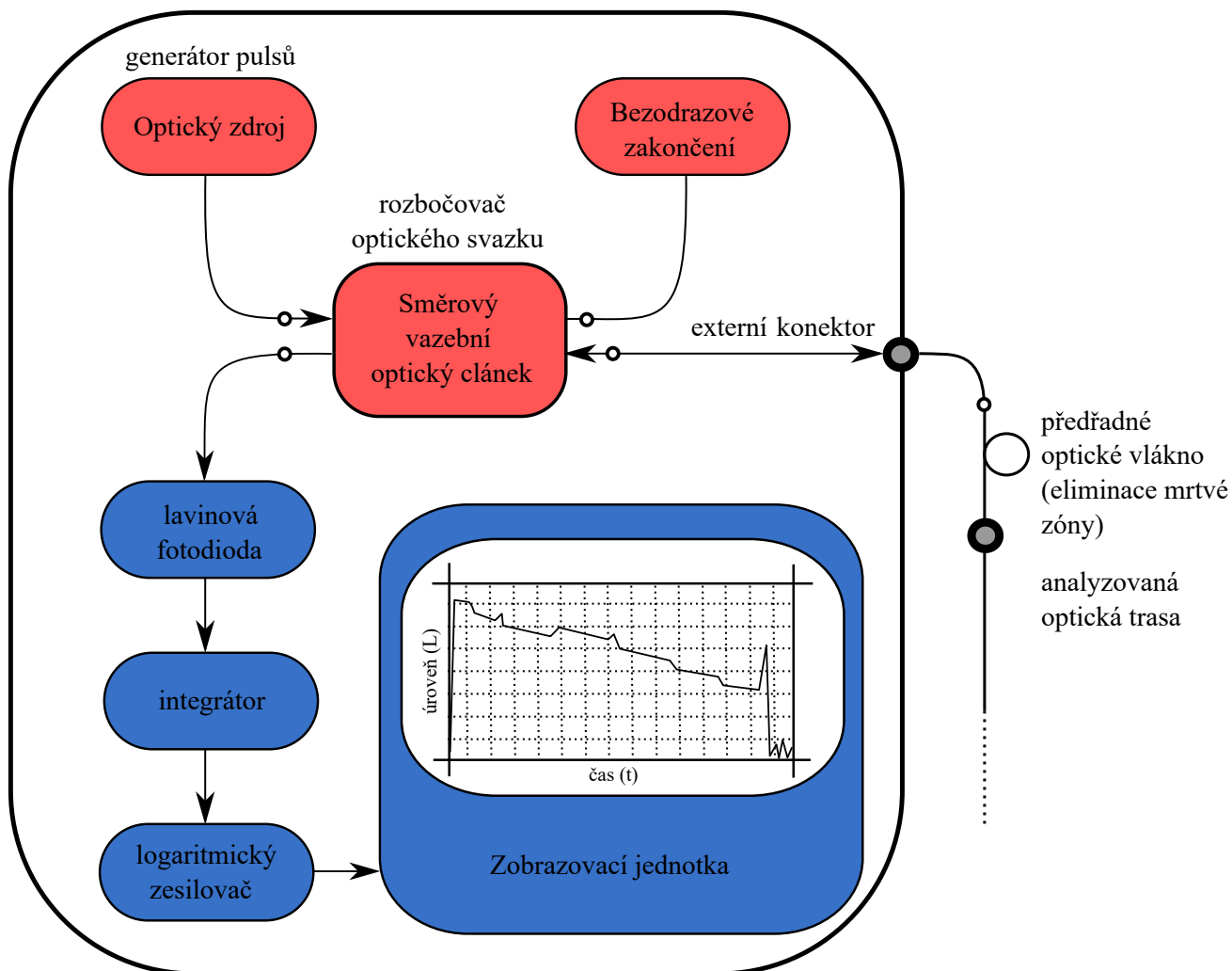
Nepřímé měření je založeno na analýze zpětně odraženého světla vlivem všesměrového Rayleighova rozptylu. Pro měření útlumu nepřímou metodou se používá přístroj nazývaný reflektometr (OTDR), což znamená v překladu optická reflektometrie v časové oblasti (Optical Time-domain Reflectometry).

4.2.1 Metoda zpětného rozptylu

Metoda zpětného rozptylu je založena na složitějším principu, než na jakém jsou založeny přímé metody, jelikož vyhodnocuje v určité časové závislosti zpětný rozptýlený optický výkon při šíření optického pulsu měřenou trasou.

Reflektometr obsahuje minimálně zdroj světla, vazební člen nebo cirkulátor, který dokáže směřovat světlo, fotodiodu, signálový procesor a zobrazovací jednotku. Světelný zdroj vpouští přes směrový vazební člen do předřadného a následně analyzovaného vlákna krátké impulzy světla o analyzované vlnové délce. Zpětný rozptyl nebo odrazy světla na čelech vlákna se vracejí zpět do směrového vazebního členu v přístroji, který přivede signál na fotodetektor. Signálový procesor zajišťuje zesílení a je prováděna integrace v čase, proto měření trvá od několika sekund po několik minut. Výsledný průběh úrovně signálu v čase je zobrazen na displeji přístroje. Blokové schéma je naznačeno na obrázku 22. Při měření se využívá předřadného vlákna, které překlenuje vstupní mrtvou zónu přístroje, ovšem za cenu zvětšení délky trasy. Při navazování optických impulsů do vlákna dochází zároveň k Fresnelovu odrazu, jenž se odrazí zpátky a poté putuje přes optický dělič k citlivé fotodiodě. Výkon odraženého optického záření převyšuje výkon záření rozptýleného a dochází k přehlcení fotodetektoru a chybnému vyhodnocení útlumu trasy. Existují mnohé technologie, které dokážou omezit tento nežádoucí jev, nicméně první Fresnelův odraz nemůže být zcela odstraněn bezesbýtku. Proto korektní měření útlumu metodou zpětného rozptylu může být provedeno až po překlenutí určité vzdálenosti od začátku měřené trasy. Tato

vzdálenost se nazývá mrtvá zóna. Délka mrtvé zóny se také udává jako jeden z parametrů OTDR přístrojů, zpravidla se jedná o jednotky až desítky metrů.



Obrázek 20: Reflektometr OTDR.

Pro korektní stanovení útlumu měřeného úseku je potřeba vlákno měřit z obou stran a znát hodnotu skupinového indexu lomu analyzovaného vlákna. Proto se metoda používá spíše než, pro určení útlumu optických vláken, pro analýzu kvality optických tras, pro hledání poruch na trasách a nekvalitních spojení vláken.

5 Postup měření útlumu optických děličů

Měření bylo zaměřeno na přenosové parametry optických děličů a při měření bylo postupováno dle normy ČSN EN 61300-3-4 ed. 2. Proto byla pro měření optických děličů zvolena přímá metoda měření útlumu, a to konkrétně metoda vložných ztrát s nastavením reference A3. Tato metoda je blíže popsána v předchozí kapitole 4.1.2. Útlum optických děličů byl měřen před, při ozáření a následně jednou za měsíc po ozáření. Tato časová prodleva byla zvolena z důvodu pozorování dlouhodobého vlivu záření na děliče. Měření před a po ozáření probíhalo v laboratoři Vysoké školy báňské Technické univerzity Ostrava. Měření při ozařování probíhalo v Ústavu jaderného výzkumu Řež u Prahy. V následující kapitole jsou popsány průběhy měření.

5.1 Měření přenosových vlastností

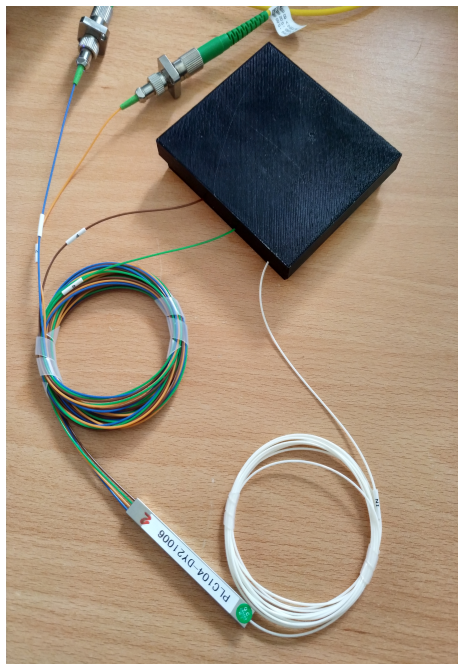
Hodnota výkonu procházejícího optickým děličem je nezbytná pro výpočet útlumu. Na optických děličích byly zkoumány tyto parametry: vazební poměr, vložné ztráty, celkové ztráty, homogenita ztrát a směrovost. Tyto parametry jsou blíže popsány v kapitole 3.3. Měření bylo provedeno na dvou vlnových délkách a to na 1310 nm a 1550 nm. Nejprve bylo provedeno základní měření nových, neozářených děličů, abychom mohli zkoumat změnu parametrů těchto děličů, vlivem ozáření. Při každém měření byla nejprve zjištěna hodnota vstupního výkonu, která je označena jako P_0 . Následně byly proměřeny všechny kombinace výstupů a to i z obou stran. Tedy u optického děliče, který má dělicí poměr 1:2 bylo provedeno celkem šest měření každá s jinou kombinací vstup, výstup. Jednotlivé naměřené hodnoty byly označeny podle kombinace vstupu a výstupu. Je-li naměřená hodnota označena, například P_{10} , znamená to že zdroj záření jsem připojil na výstup P_1 a detektor na vstup P_0 . Označení vstupů a výstupů děliče je naznačeno na obrázku 7. Na každém optickém děliču bylo, pro vyšší korektnost měření, provedeno deset nezávislých měření najednou, ze kterých se následně vypočítala průměrná hodnota. Z těchto průměrů byly následně vypočteny všechny zkoumané parametry.

Tabulka 3: Příklad naměřených hodnot děliče 4.

| 1310 nm | P_0 [mW] | P_{01} [mW] | P_{02} [mW] | P_{10} [mW] | P_{20} [mW] | P_{12} [nW] | P_{21} [nW] |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Průměr | 2,592 | 1,204 | 1,222 | 1,174 | 1,25 | 7,04 | 8,418 |

Postup byl stejný i při měření děličů s dělicím poměrem 1:4, jen s tím rozdílem, že hodnot je podstatně více z důvodu většího počtu kombinací výstupů. U těchto děličů bylo provedeno měření referenční hodnoty a následně bylo proměřeno všech dvacet kombinací vstupu a výstupů.

Během měření děličů bylo zjištěno, že hodnotu procházejícího výkonu děličem, negativně ovlivňuje parazitní světlo, které se naváže do optického děliče přes konektory, na kterých zrovna neprobíhá měření. Nejvíce bylo tímto světlem ovlivněno měření přeslechu. Od pátého měření první sady optických děličů a od čtvrtého měření druhé sady, byla použita stínící krabička do, které se uzavíraly konektory, na kterých nebylo zrovna prováděno měření.



Obrázek 21: Měření výkonu s použitím stínící krabičky.

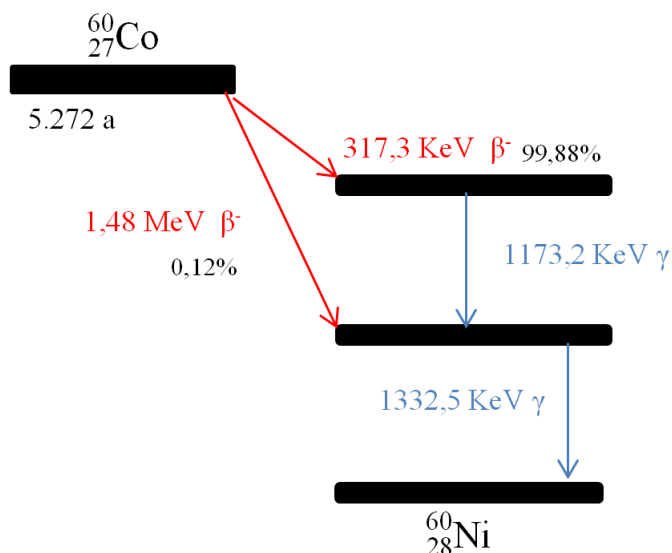
6 Popis ozařování optických děličů gama zářením

Gama záření je druh ionizujícího záření. Toto záření se vytváří spolu s α a β zářením, přičemž všechna tato záření vznikají při radioaktivním rozpadu jádra. Záření gama je vysokoenergetické a má velmi krátkou vlnovou délku až 10^{-13} m. Čisté gama zářiče se v přírodě nevyskytují. Při průchodu radioaktivního záření látkou se část záření v materiálu pohltí. Energie záření se přitom mění na jinou energii, například na teplo. Pro měření se používá jednotka Gy (Gray), což je jednotka absorbované dávky záření. Jeden Gy odpovídá energii jednoho joulu, který je absorbován kilogramem látky. Ozařování živých organismů, včetně lidí dávkou nad 1 Gy, způsobuje akutní radiační syndrom nebo akutní radiační onemocnění.

Jak bylo dříve zmíněno, pro ozaření optických děličů byl použit Cobalt-60, ^{60}Co . Jedná se o syntetický radioaktivní izotop kobaltu s poločasem rozpadu 5,2714 let. Jedná se o zdroj tvrdého gama záření s energií 1173+1332keV. Protože ^{60}Co lze relativně snadno připravit a manipulace není složitá, používá se v medicíně jako zdroj gama záření pro ozařování rakovinných nádorů. Rovněž se používá v defektoskopii slouží k likvidaci hub a plísni v historicky cenných dřevěných předmětech, které nelze ošetřit klasickými chemickými látkami, aby si udržely svůj vzhled. Vyrábí se uměle pomocí aktivace neutronů izotopu ^{59}Co . V první fázi se ^{60}Co přeměňuje beta zářením ($\beta = e^-$) na excitované stavy niklu ^{60}Ni , což je stabilní nuklid [15].



Poté se nově vytvořené excitované jádro zbaví přebytečné energie emitováním gama záření.



Obrázek 22: Rozklad ^{60}Co na ^{60}Ni .

Ozařování optických děličů probíhalo v Ústavu jaderného výzkumu Řež u Prahy. Celkem byla provedena dvě nezávislá ozařování, při kterých byl jako ozařovací prvek použit Cobalt-60. První se uskutečnilo v termínu od 1. do 4. 7. 2019. Děliče byly rozděleny podle výrobní technologie do dvou skupin. PLC děliče byly ozářeny dávkou 50 kGy při pokojové teplotě, což je přibližně 20 °C. FBT děliče byly také ozářeny dávkou 50 kGy, ale s tím rozdílem, že teplota během ozařování byla 60 °C. Druhé ozařování proběhlo v termínu od 23. do 26. 9. 2019. Nyní byly optické děliče rovněž rozděleny do dvou skupin po čtyřech děličích, a to tak, že v každé skupině byly dva PLC a dva FBT. Obdobně jak při prvním ozařování proběhl test zrychleného radiačního stárnutí při pokojové teplotě a při teplotě 60 °C, ale tentokrát byly děliče ozářeny dávkou 60 kGy.



Obrázek 23: Kobaltové ozařovače Prazdroj (vlevo) a Roza (vpravo).

6.1 Termín 1. - 4. 7. 2019

Testování proběhlo na kobaltovém ozařovači Roza. Testovací vzorky byly připevněny na nerezový buben z perforovaného plechu. Průměr a výška bubnu je 50 cm. Před začátkem každého ozařování proběhla předběžná dozimetrie, za účelem zjištění reálného dávkového příkonu. Před samotným ozařováním byla rovněž ověřena funkce termoboxu, teplotní stabilita, funkce regulace teploty a výměny vzduchu v boxu.

6.1.1 Zrychlené radiační stárnutí při pokojové teplotě

Při této zkoušce byly použity vzorky číslo 1, 2, 3, 4 a byly ozářeny dávkou ionizujícího záření 50 kGy. Zrychlené radiační stárnutí proběhlo v kobaltové ozařovně a jako zdroj gama záření byl použit Cobalt-60. Ozařování proběhlo přibližně při teplotě 20 °C a dávkovaný příkon byl 1,6 kGy/h.

6.1.2 Zrychlené radiační stárnutí při teplotě 60 °C

Při této zkoušce byly použity vzorky číslo 5, 6, 7, 8 a byly ozářeny dávkou ionizujícího záření 50 kGy. Zrychlené radiační stárnutí proběhlo v kobaltové ozařovně a jako zdroj gama záření

byl použit Cobalt-60. Ozařování proběhlo přibližně při teplotě 60 °C za pomoci termoboxu a dávkovaný příkon byl 1,6 kGy/h.



Obrázek 24: Pohled do ozařovací šachty s nainstalovaným termoboxem.

6.2 Termín 23. - 26. 9. 2019

Ozařování optických děličů proběhlo na kobaltovém ozařovači Prazdroj. Před začátkem každého ozařování proběhla předběžná dozimetrie, za účelem zjištění reálného dávkového příkonu. Před samotným ozařováním byla rovněž ověřena funkce termoboxu, teplotní stabilita, funkce regulace teploty a výměny vzduchu v boxu.

6.2.1 Zrychlené radiační stárnutí při pokojové teplotě

Při této zkoušce byly použity optické děliče číslo 9. 10. 11. 12. Zkušební vzorky byly připevněny na nerezový buběn z perforovaného plechu. Průměr a výška bubnu je 40 cm. Dávka ionizujícího záření byla 60 kGy a jako zdroj gama záření byl použit Cobalt-60. Testování probíhalo při teplotě přibližně 20 °C a dávkový příkon byl 1,1 kGy.

6.2.2 Zrychlené radiační stárnutí při teplotě 60 °C

Při této zkoušce byly použity vzorky číslo 13, 14, 15, 16 a byly ozářeny dávkou ionizujícího záření 60 kGy. Zkušební vzorky byly připevněny na teplotní píčky ve vzdálenosti 20cm od zářiče, tak aby dozimetrie byla shodná s ozařováním při pokojové teplotě.

7 Aktuální stav výzkumu gama záření na proces stárnutí pasivních fotonických komponent

Procesem urychleného stárnutí, vlivem teplotního nebo radiačního stárnutí, se zabývá řada vědeckých prací. Po letech expanze optických sítí se objevují nová témata a problémy, kterými se z počátku éry optických vláken nikdo nezabýval. První optická vlákna byla umístěna do země na počátku 90. let. Jejich odhadovaná životnost byla 30 let. Neexistuje optické vlákno, které by zmiňovaných 30 let vydrželo. Z toho vyplývá, že udávaná životnost optických vláken je čistě hypotetická. Vzhledem k neustále rostoucí poptávce po optickém výkonu distribuovaného optickým vláknem, je třeba proces stárnutí otestovat. Pozornost společnosti, telekomunikačních operátorů a vědecké komunity je zaměřena na řešení tohoto problému, protože znalosti o procesu stárnutí a nalezení modelu umožňujícího předpovídat časový vývoj parametru, budou mít obrovský ekonomický význam. Problematiku zrychleného stárnutí pasivních optických komponent lze sledovat z několika úhlů. Obrovské zvýšení výkonu, zvýšení počtu kanálů v jednom vlákně, vysoká teplota a napětí, komprese nebo dávka záření gama snižují očekávanou životnost optických pasivních komponent. Optická vlákna jsou neelektrická, odolná vůči vysokofrekvenčnímu rušení a elektromagnetickému rušení, mají nízkou hmotnost a velikost. Optické senzory mají vysokou přesnost pozorovaných proměnných, proto mohou být využity pro datové komunikační systémy. Většina fyzikálních vlastností může být zachycena pomocí optických vláken. Teplota, tlak, zvuk, poloha, rotace, intenzita světla, radiace, stres, elektrické pole, hladina kapaliny, chemická analýza a vibrace jsou jen některé z jevů, které lze zachytit.

První zmíněný výzkum se věnoval vlivu gama záření na multivídná vlákna. Při postupném ozařování s dávkou gama záření 476 Gy/hod se průběžně zvyšovala teplota až na 600°C. Výzkum dospěl k závěru že gama záření nejvíc ovlivňuje přenosové parametry na vlnových délkách nižších než 1000 nm a útlum způsobený gama zářením se výrazně snižoval se zvyšující se teplotou [19].

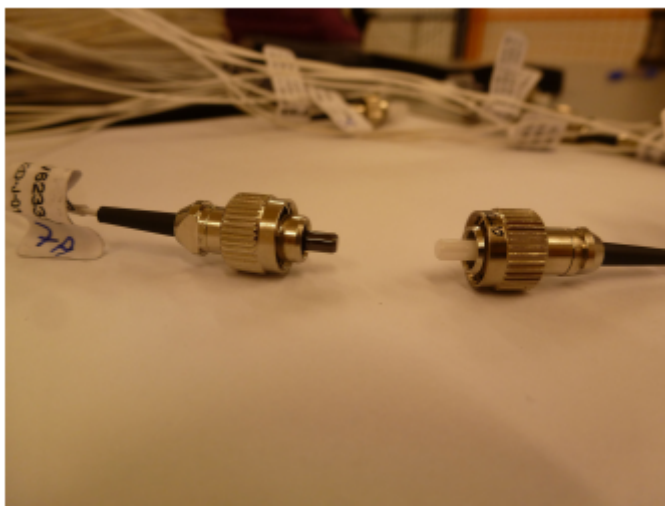
Další výzkum je zaměřený na optické děliče a jejich přenosové parametry. Pro výzkum byly použity děliče s dělicím poměrem 1:2, 1:4 a 1:8. Měření optických děličů 1:2 proběhlo při dávce 5 kGy, 20,15 kGy a 34,32 kGy. Dělič 1:4 dostal dávku 5kGy a dělič 1:8 dávku 29,32 kGy. Výsledky měření vložných ztrát ukázaly, že byl rozdíl mezi měřeními bezprostředně po ukončení ozařování a měřeními s delším časovým odstupem. Vložné ztráty se během ozařování zvýšily, ale nárůst nebyl příliš velký. Vložné ztráty se snižovaly s odstupem času, v některých případech dokonce klesli ještě níž, než před ozářením. Hodnoty vložných ztrát se po sérii ozařování příliš nelišily od původních hodnot, naměřených před ozářením. Z tohoto důvodu je možné říct, že dávka 34,32 kGy nezpůsobila významné změny v krystalové mřížce materiálu vazebního členu. Toto tvrzení bylo dále potvrzeno výsledky optických děličů 1:4 a 1:8, kde nedošlo k podstatným změnám vložných ztrát. Hodnoty vložných ztrát se zvýšily při ozáření, nicméně se začaly po ukončení označování vracet na původní hodnotu. Vazební poměr se příliš nezměnil před, během ani po ozařování. Výjimkou byl pouze dělič 1:2 s vazebním poměrem 30/70, který byl proti měření před ozářením změněn o 10%. Záření mělo pozitivní vliv na parametr celkové ztráty.

Děliče 1:2 dosáhli podstatného zlepšení hlavně tam, kde se celkové ztráty přiblížili hranici 0,1 dB pro vlnovou délku 1550 nm. U optického děliče 1:4 nedošlo k žádné významné změně. Dělič 1:8 vykazoval zhoršení celkových ztrát přibližně o 0,3 dB. Homogenita ztrát se zlepšila o 2 dB pro obě vlnové délky u děliče 1:2 s vazebním poměrem 30/70 po sérii ozařování. U ostatních děličů 1:2 nedošlo k významnému zlepšení ani zhoršení tohoto parametru. Homogenita ztrát se ozářením zhoršila přibližně o 0,12 dB u děliče 1:4 a přibližně o 0,3 dB u děliče 1:8. Směrovost byla u všech děličů 1:2 nad 50 dB před i po sérii ozařování. Dělič 1:4 měl na všech kombinacích výstupů směrovost nad 60 dB před i po ozáření. Ani u děliče 1:8 nenastala žádná významná změna která by měla zásadní vliv na funkčnost děliče. Z výše uvedených výsledků je zřejmé, že výzkum stárnutí optických vazebních členů gama zářením je právě na začátku. Výsledky neukázaly žádné zásadní změny, a proto je potřeba provést další ozařování [15]. Pro další výzkum byly použity děliče s dělicím poměrem 1:2 a vazebním poměrem 50/50, 30/70 a 10/90. Tento výzkum poukazuje na změny parametrů optického děliče, jmenovitě parametry MFD (Mode field diameter) a FWHM (Full width at half maximum). Optické děliče byly postupně ozářeny dávkami gama záření 5 kGy, 20,15 kGy a 34,32 kGy. Hodnoty obou parametrů se pro dělič 50/50 snížily po ozáření dávkou 34,32 kGy pro vlnové délky 1303 nm i 1553 nm. Se zvyšujícími dávkami radiace se hodnota MFD snižovala. Na zbývající děliče 30/70 a 10/90 mělo gama záření jen zanedbatelný vliv. Parametry MFD a FWHM pro vlnovou délku 1553nm dosáhly vyšších hodnot než pro vlnovou délku 1303nm. U optického děliče s vazebním poměrem 10/90 dosáhl sledovaný parametr ve větvi s podílem 90% výrazně vyšších hodnot. Dá se tedy říct že gama záření v této míře nemělo na sledované parametry zásadní vliv [16]. Ve velkém hadronovém urychlovači ve Švýcarsku CERNu byl proveden experiment zaměřený na vliv gama záření a neutronů na jednovidové vlákna na vlnové délce 1550 nm. Zkoumány byly čisté křemičité vlákna a germaniem dokované vlákna. Doba trvání výzkumu byla 10 let. Výsledky ukázaly, že útlum byl větší v germaniem dokovaných vláknech a velikost útlumu v čistém křemičitém vlákně byla závislá na velikosti dávky gama záření [20].

V tomto výzkumu byl vliv gama záření studován pro optická vlákna obohacená erbiem. Dva typy optických vláken byly namáhány třemi rychlostmi dávkování gama záření - 35, 1000, 20500 rad/min. Byl měřený útlum při vlnové délce 980 nm, 1300 nm a 1500 nm. Měření postupně proběhlo při třech různých teplotách -54°C, 30°C a 80°C. Výsledkem výzkumu je fyzikální model popisující teplotní temperování optického útlumu ve vlákně. Tento model má jen 2 nastavitelné parametry a to intenzitu dávky gama záření a teplotní závislost útlumu vyvolanou ozářením [21].

8 Vliv gama záření na přenosové vlastnosti optických děličů

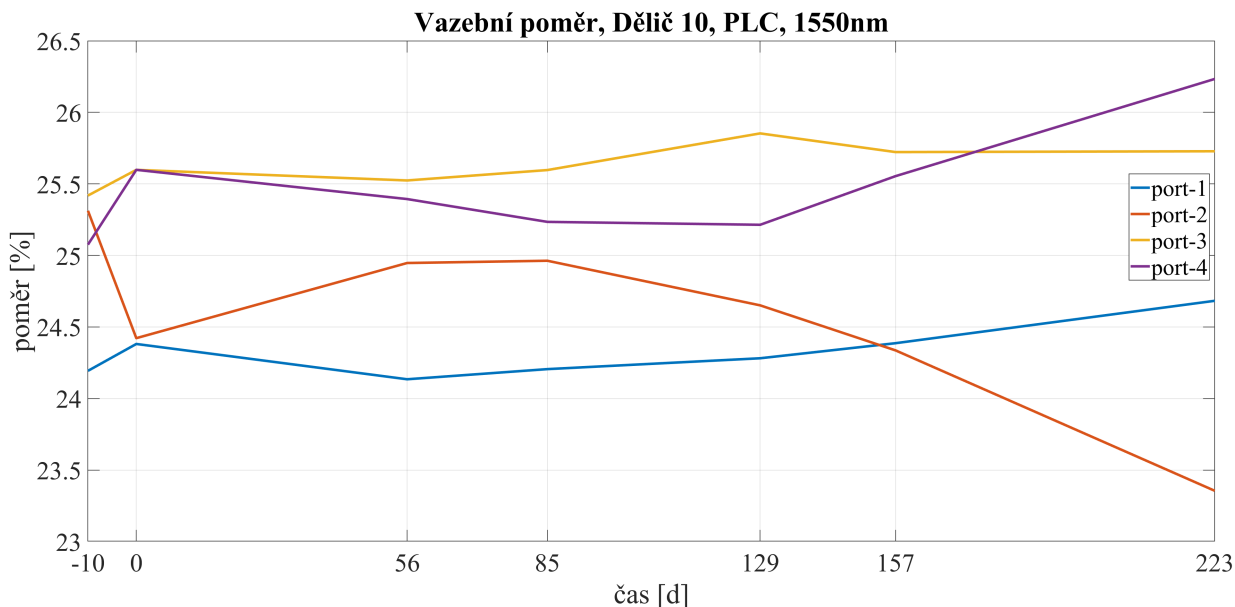
Kromě poškození ochranných materiálů má gama záření vliv i na vnitřní strukturu optického vlákna. Proto je nutné specifikovat změny v optickém vlákne a zjistit, proč k těmto změnám dochází. Gama záření mění krystalickou strukturu ferule tak, že zcela zčernala. Optické děliče, které byly vystaveny dávce gama záření, byly zjevně fyzicky poškozeny.



Obrázek 25: Ferule vystavená gama záření.

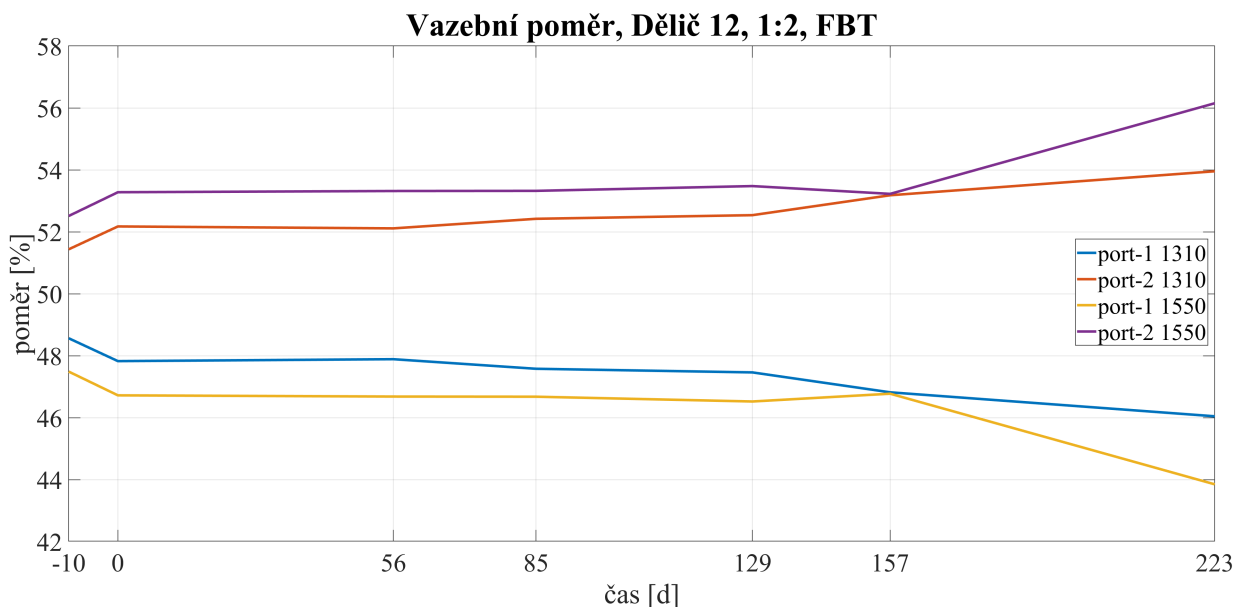
8.1 Vliv záření na vazební poměr

V grafu 26 je znázorněn vliv gama záření na optický dělič PLC s dělicím poměrem 1:4. Při prvním měření byla zjištěna nejnižší hodnota vazebního poměru na portu-1, kde hodnota, dosáhla 24,2%. Vazební poměr ostatních portů při prvním měření se pohyboval mezi 25% a 25,5%. Vlivem ozařování se vazební poměr druhého portu zmenšil o 0,9% na hodnotu 24,4% a přiblížil se tak hodnotě vazebního poměru na prvním portu. U čtvrtého a třetího děliče došlo k mírnému navýšení vazebního poměru. Během následujících měření po ozařování se rozptyl hodnot vazebního poměru pomalu zvětšoval. K největšímu rozptylu hodnot vazebních poměrů došlo při měření, které proběhlo 223 dní po ozáření. Při posledním měření byly naměřeny tyto hodnoty, port-1 24,7%, port-2 23,4%, port-3 25,7%, port-4 26,2%. Došlo tedy během relaxace materiálu ke zhoršení vazebního poměru.



Obrázek 26: Naměřený vazební poměr děliče 10.

Optický dělič 12 již při počátečním měření vykazoval velké rozdíly mezi vazebními poměry, jak na pracovní vlnové délce 1550 nm, tak i na jeho nepracovní vlnové délce 1310 nm. Při prvním měření před ozáření byla odchylka od 50% pro vlnovou délku 1310 nm 1,45% a pro vlnovou délku 1550 nm 2,01%. Na grafu 27 je vidět, že gama záření mělo na dělič negativní vliv. Při ozařování se zhoršil vazební poměr o 0,74% pro nepracovní vlnovou délku. Vložné ztráty pro pracovní vlnovou délku se zhoršily o 0,77%. Při následujícím měření nedošlo k žádné větší změně vazebního poměru, až při posledním měření se hodnoty vazebního poměru opět zhoršily. Konkrétně na nepracovní vlnové délce se hodnota vazebního poměru zhoršila o 0,77%, takže celková odchylka od průměru byla 3,95%. Pro pracovní vlnovou délku byly při posledním měření zjištěny hodnoty vazebního poměru 43,85% pro port-1 a 56,15% pro port-2. Tyto hodnoty vazebního poměru jsou odchýleny o 6,15% od průměru. Tato odchylka se už nachází mimo toleranci, byla tedy vlivem gama záření zhoršena funkčnost děliče.



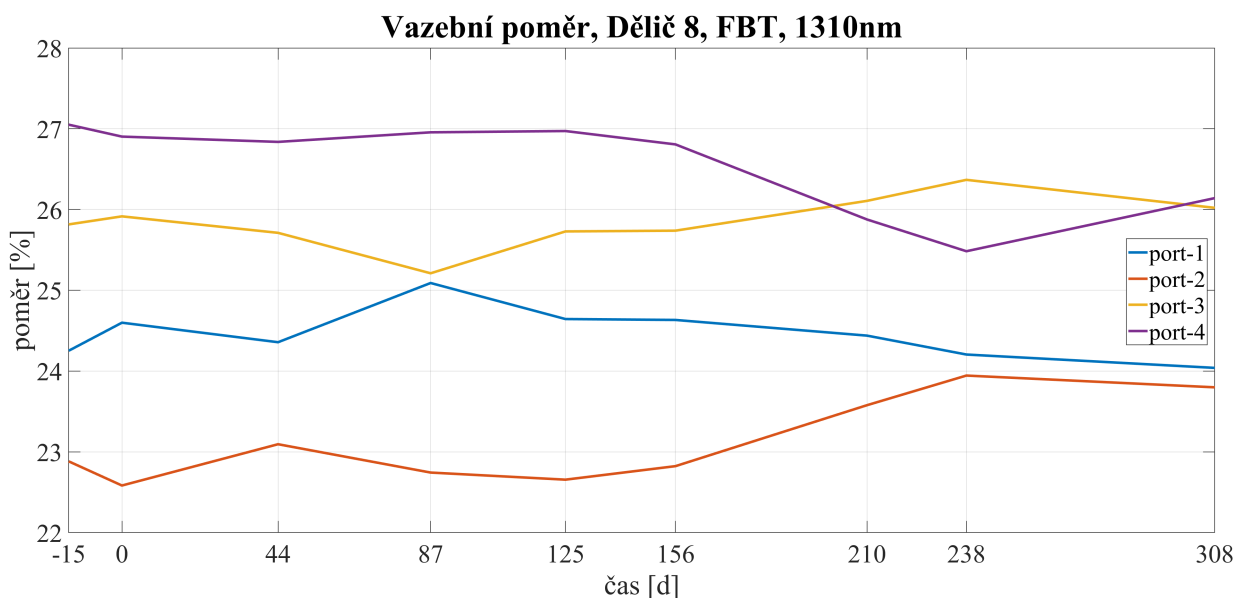
Obrázek 27: Naměřený vazební poměr na nepracovní (1310 nm) a pracovní (1550 nm) vlnové délce děliče 12.

Tabulka 4: Naměřené hodnoty vazebního poměru použité v grafech 26 a 27.

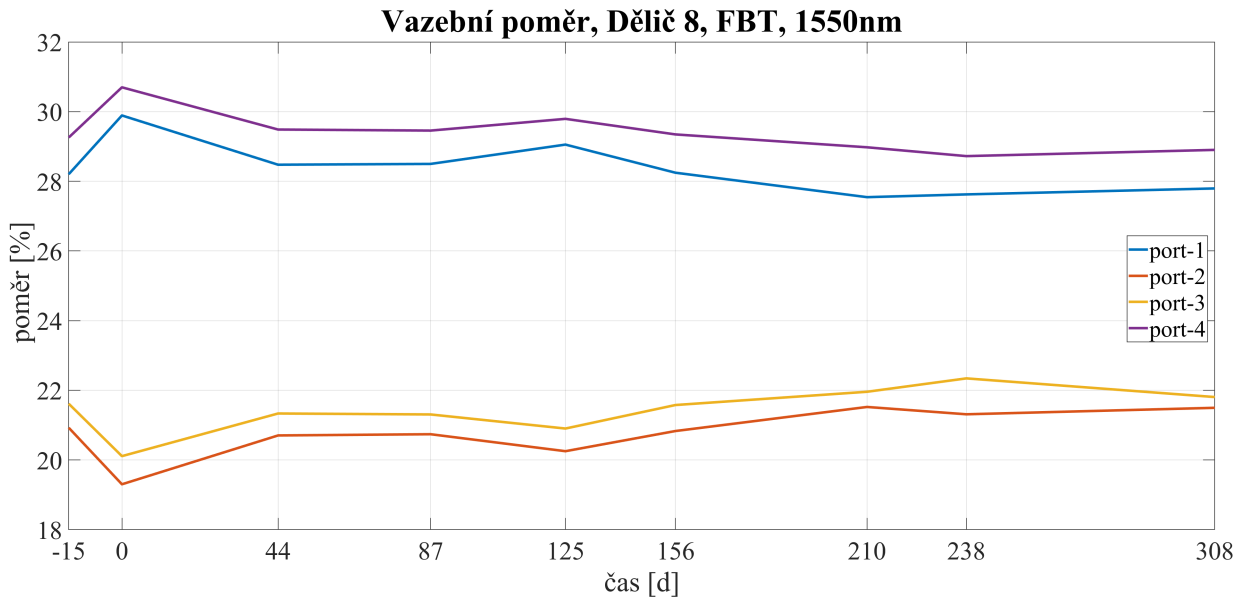
| | Port | λ | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|----------|------|-----------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dělič 10 | 1 | 1550 | 24,193 | 24,381 | 24,135 | 24,205 | 24,281 | 24,387 | 24,683 |
| | 2 | 1550 | 25,312 | 24,422 | 24,947 | 24,963 | 24,651 | 24,336 | 23,355 |
| | 3 | 1550 | 25,417 | 25,598 | 25,524 | 25,597 | 25,853 | 25,722 | 25,728 |
| | 4 | 1550 | 25,0756 | 25,598 | 25,394 | 25,235 | 25,214 | 25,554 | 26,234 |
| Dělič 12 | 1 | 1310 | 48,564 | 47,826 | 47,888 | 47,579 | 47,462 | 46,819 | 46,045 |
| | 2 | 1310 | 51,436 | 52,174 | 52,116 | 52,421 | 52,538 | 53,181 | 53,955 |
| Dělič 12 | 1 | 1550 | 47,488 | 46,721 | 46,682 | 46,677 | 46,523 | 46,774 | 43,849 |
| | 2 | 1550 | 52,512 | 53,318 | 53,323 | 53,477 | 53,226 | 53,955 | 56,151 |

Na grafech 28 a 29 je zobrazen vliv gama záření na vazební poměr FBT děliče při pracovní (1310nm) a nepracovní (1550nm) vlnové délce. Z prvního grafu je zřejmé že gama záření mělo na dělič 8 při provozní vlnové délce pozitivní vliv. Při prvním měření bylo zjištěno že se vstupní výkon rozdělí mezi výstupní porty v poměru 24,3%, 22,9%, 25,9% a 27,1%. Po ozáření se hodnota vazebního poměru u všech portů změnila jen o desetiny procenta. Výraznější změna vazebního poměru nastala až 210 dní po ozáření, kdy se k sobě začal přibližovat vazební poměr prvního a druhého portu a vazební poměr třetího a čtvrtého portu. Při měření 308 dní po ozáření byly na jednotlivých portech naměřeny hodnoty pro port-1 24%, port-2 23,8%, port-3 26% a port-4 26,1%. Druhý graf 29 znázorňuje vliv gama záření na dělič 8 při nepracovní vlnové délce. Z grafu můžeme vidět, že porty jsou rozděleny do dvou skupin. Port-1 a port-4 mají výrazně větší

hodnotu než druhá skupina, která obsahuje porty dva a tři. Jelikož je dělič navržen pro práci na vlnové délce 1310nm, tak jsou velké rozdíly mezi těmito skupinami. Vazební poměr děliče před ozářením je port-1 28,2%, port-2 20,9%, port-3 21,6% a port-4 29,3%. Po ozáření se hodnota vazebního poměru prvního a čtvrtého portu zvětšila o 1,5%. Vazební poměr druhé skupiny portů se zmenšil o 1,5%. S odstupem času se vazební poměr přibližuje k průměrné hodnotě 25%. Při posledním měření byl naměřen tento vazební poměr: port-1 27,8%, port-2 21,5%, port-3 21,8% a port-4 28,9%. Došlo tedy k mírnému zlepšení vazebního poměru vlivem gama záření, jak pro pracovní tak i nepracovní vlnovou délku.



Obrázek 28: Naměřený vazební poměr na pracovní vlnové délce děliče 8.



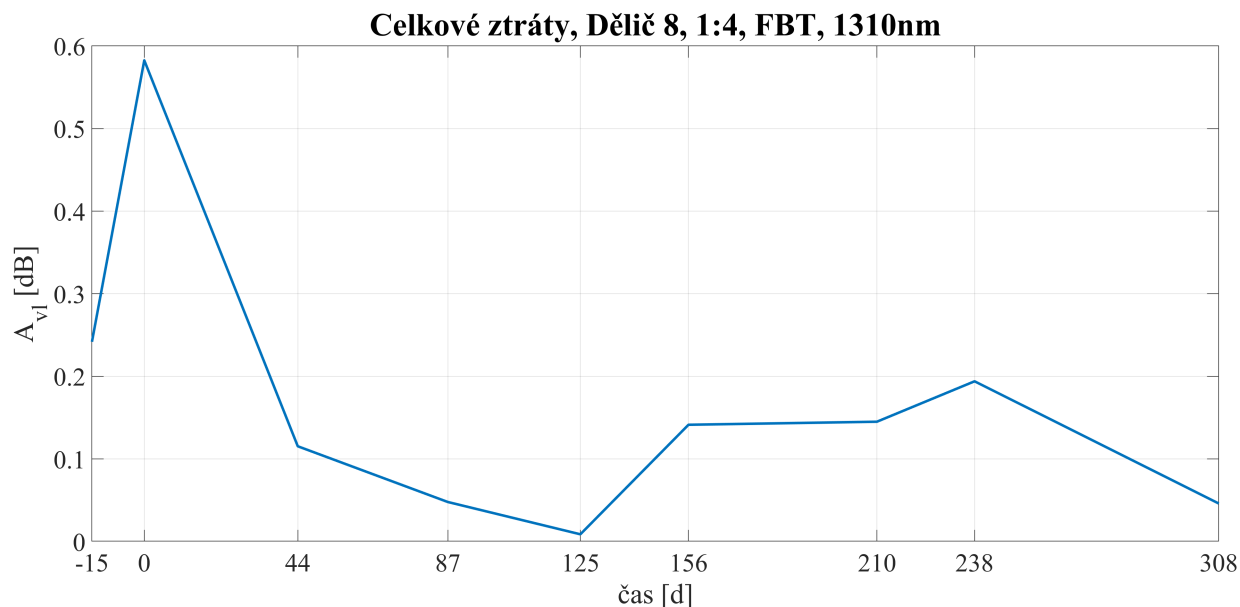
Obrázek 29: Naměřený vazební poměr na nepracovní vlnové délce děliče 8.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty vazebního poměru pro grafy 28 a 29.

| | Port | -15. | 0 | 44 | 87 | 125 | 156 | 210 | 238 | 308 |
|--------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dělič 8 1310 nm | 1 | 25,816 | 25,915 | 25,711 | 25,211 | 25,729 | 25,738 | 26,107 | 26,367 | 26,021 |
| | 2 | 24,252 | 24,599 | 24,357 | 25,09 | 24,644 | 24,633 | 24,439 | 24,205 | 24,039 |
| | 3 | 22,882 | 22,583 | 23,094 | 22,744 | 22,656 | 22,823 | 23,578 | 23,944 | 23,799 |
| | 4 | 27,05 | 26,903 | 26,837 | 26,955 | 26,971 | 26,806 | 25,876 | 25,483 | 26,141 |
| Dělič 8 1550 nm | 1 | 28,203 | 29,889 | 28,476 | 28,498 | 29,053 | 28,246 | 27,544 | 27,624 | 27,794 |
| | 2 | 21,615 | 20,111 | 21,335 | 21,307 | 20,903 | 21,578 | 21,958 | 22,342 | 21,806 |
| | 3 | 20,926 | 19,303 | 20,704 | 20,739 | 20,252 | 20,831 | 21,522 | 21,312 | 21,498 |
| | 4 | 29,256 | 30,697 | 29,485 | 29,455 | 29,792 | 29,345 | 28,976 | 28,722 | 28,901 |

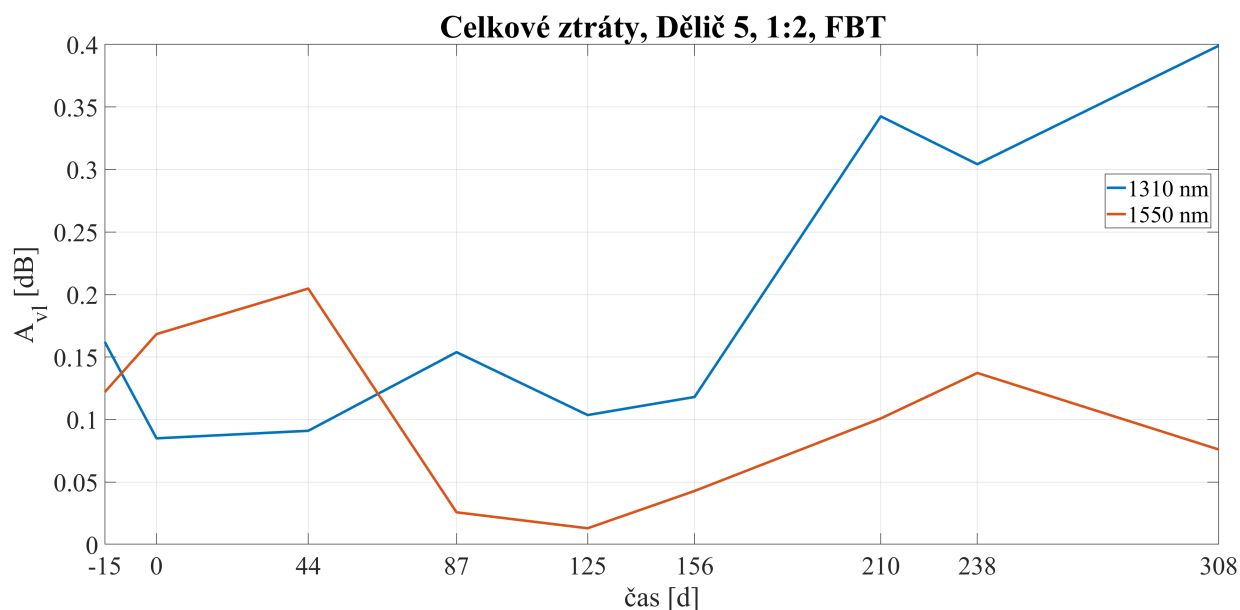
8.2 Vliv záření na celkové ztráty

U celkových ztrát, stejně jako u ostatních přenosových vlastností, došlo k největšímu nárůstu útlumu při ozařování optického děliče gama zářením. Následně při měření po ozáření, už byla díky relaxaci materiálu naměřena nižší hodnota útlumu, než při ozařování. Na grafu 30 je znázorněna změna celkových ztrát vlivem gama záření. Před ozáření měl optický dělič 8 hodnotu celkových ztrát 0,24 dB. Tato hodnota se při ozařování zvětšila o 0,34 dB na hodnotu 0,58 dB. 44 dní po ozáření byla naměřena hodnota 0,12 dB. Celkové ztráty pak dále klesaly až do třetího měření po ozáření. 125 dní po ozáření optického děliče byla naměřena hodnota 0,009 dB. Při dalších měřeních začal útlum opět stoupat a do měření, které proběhlo 238 dní po ozáření byla hodnota celkových ztrát 0,19 dB. Při posledním měření 308 dní po ozáření hodnota celkových ztrát klesla na 0,05 dB, což je o 0,19 dB méně než před ozářením.



Obrázek 30: Naměřené celkové ztráty děliče 8.

Na grafu 31 je znázorněn vliv na celkové ztráty optického děliče s dělicím poměrem 1:2 při pracovní a nepracovní vlnové délce. Z grafu je zřejmé, že při měření na pracovní vlnové délce došlo při ozařování k nárůstu útlumu. S postupnou relaxací materiálu došlo ke snížení hodnoty celkových ztrát. Při posledním měření byla naměřena hodnota nižší, než počáteční hodnota celkových ztrát naměřená před ozářením děliče. S hodnotou celkových ztrát při měření na nepracovní vlnové délce to je přesně naopak. Při ozařování došlo k poklesu hodnoty celkových ztrát a s postupem času se útlum začal zvyšovat. Během posledního měření které proběhlo 308 dní po ozáření byla naměřena hodnota vyšší než byla hodnota celkových ztrát naměřená při měření na novém neozářeném optickém děliči.

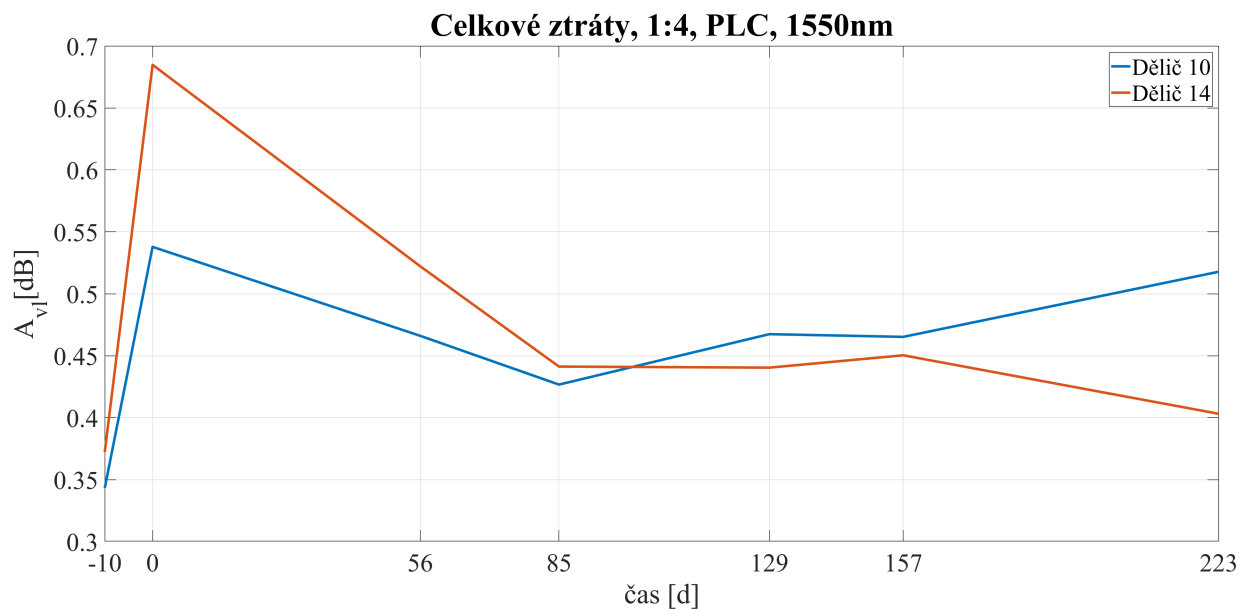


Obrázek 31: Celkové ztráty děliče 5 pro pracovní (1550nm) a nepracovní (1310nm) vlnovou délku.

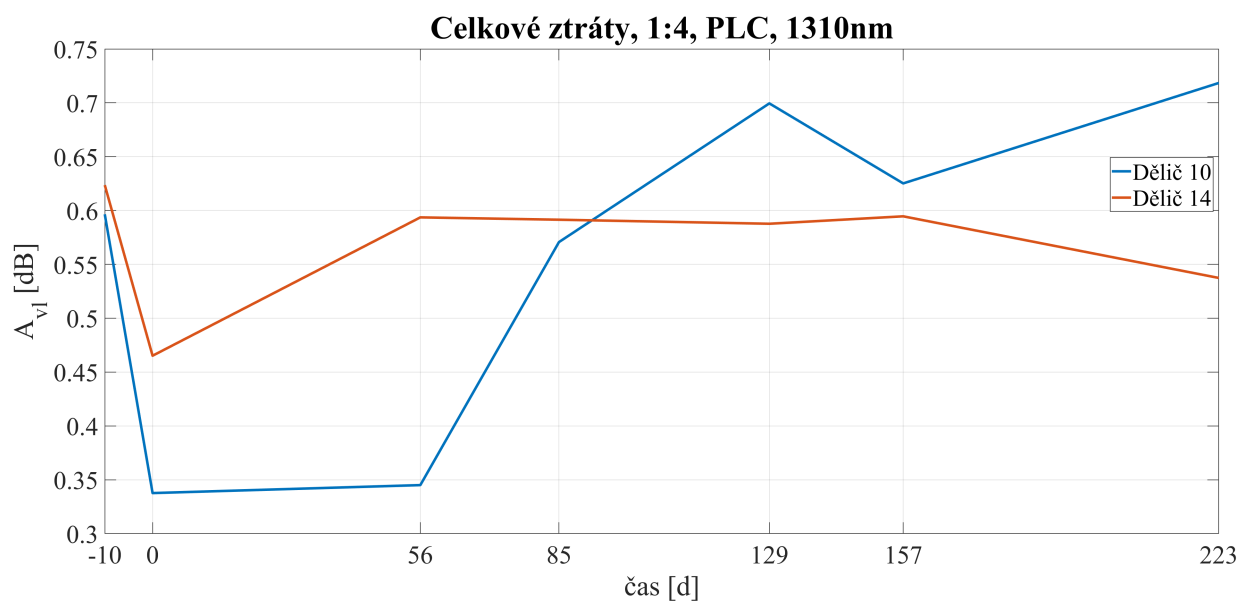
Tabulka 6: Naměřené hodnoty celkových ztrát pro grafy 30 a 31.

| | λ | -15. | 0 | 44 | 87 | 125 | 156 | 210 | 238 | 308 |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dělič 5 | 1310 nm | 0,162 | 0,085 | 0,091 | 0,154 | 0,104 | 0,118 | 0,343 | 0,304 | 0,399 |
| | 1550 nm | 0,122 | 0,168 | 0,205 | 0,026 | 0,013 | 0,043 | 0,101 | 0,137 | 0,076 |
| Dělič 8 | 1310 nm | 0,242 | 0,583 | 0,115 | 0,048 | 0,009 | 0,141 | 0,145 | 0,194 | 0,046 |

V grafech 32 a 33 můžeme vidět rozdíly vlivu gama záření na děliče při různé vlnové délce. Na prvním z grafů je vidět, že došlo k navýšení útlumu během ozařování a jeho následný pokles. Hodnota celkových ztrát děliče 14 pro vlnovou délku 1550 nm, během ozařování stoupla o 0,31 dB. Celkové ztráty děliče 14 opět s odstupem času poklesly, až se přiblížili původní hodnotě. Změny celkových ztrát děliče 10 měly podobný průběh jak u děliče 14, jen s tím rozdíle, že po druhém měření po ozáření, začala hodnota opět mírně stoupat. Pro vlnovou délku 1310 nm byl trend, až na měření při ozáření, podobný jako u vlnové délky 1550 nm. Na vlnové délce 1310 nm nastal při ozařování pokles hodnoty vložných ztrát. Následně stejně jako pro vlnovou délku 1550 nm se postupem času celkové ztráty děliče 14 opět přiblížily původní hodnotě. U děliče 10 nastal nárůst celkových ztrát oproti původní hodnotě o 0,12 dB.



Obrázek 32: Celkové ztráty dělících 1:4.



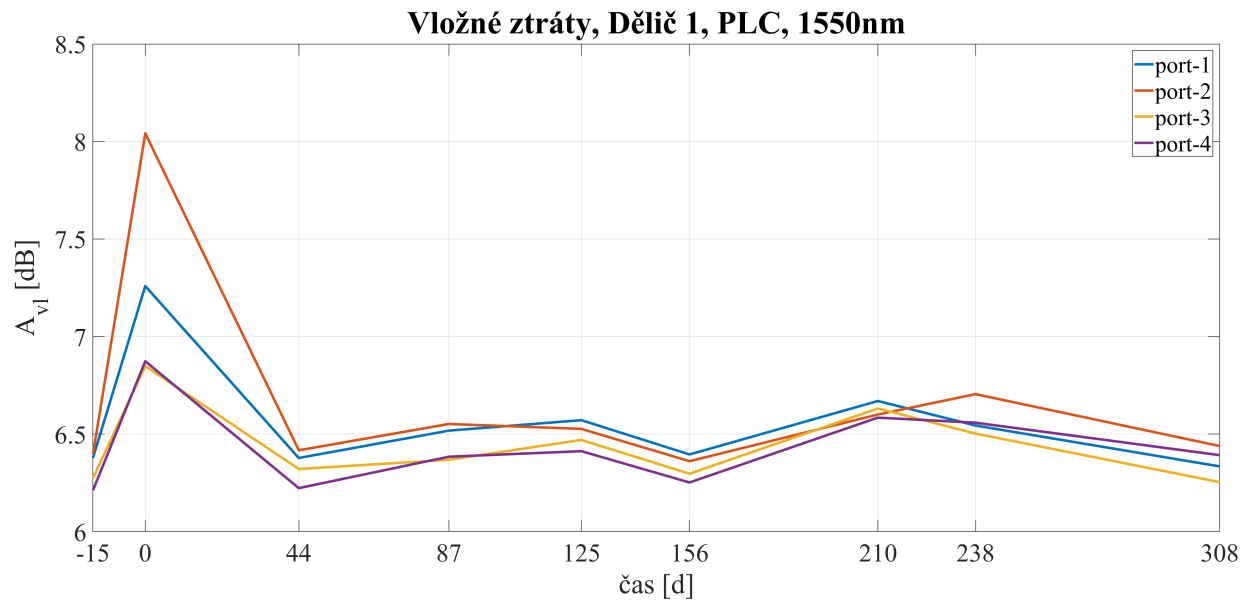
Obrázek 33: Celkové ztráty dělících 1:4.

Tabulka 7: Naměřené hodnoty celkových ztrát pro grafy 32 a 33.

| | λ | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|----------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dělíč 10 | 1310 | 0,596 | 0,337 | 0,345 | 0,571 | 0,699 | 0,625 | 0,718 |
| | 1550 | 0,343 | 0,538 | 0,466 | 0,427 | 0,467 | 0,465 | 0,518 |
| Dělíč 14 | 1310 | 0,623 | 0,465 | 0,594 | 0,591 | 0,588 | 0,595 | 0,537 |
| | 1550 | 0,372 | 0,685 | 0,522 | 0,441 | 0,44 | 0,45 | 0,403 |

8.3 Vliv záření na vložné ztráty

Jak se očekávalo, tak u většiny optických děličů došlo během ozařování k nárůstu vložných ztrát. Z grafu 34 lze vidět, že k nejvýznamnějšímu nárůstu vložných ztrát, došlo během ozařování, kdy se vložné ztráty na portu 2 zvýšily o 1,6 dB z 6,4 dB na 8 dB. Dále následoval pokles vložných ztrát následkem relaxace materiálu na hodnotu 6,4 dB. Při posledním měření byla na portech 1 a 3 naměřena nižší hodnota vložných ztrát než při měření před ozářením. Pokles nebyl nijak výrazný jedná se pouze o 0,05 dB na portu 1 a o 0,02 dB na portu 3. Na zbývajících portech 2 a 4 došlo ke zvýšení vložných ztrát. A ni v tomto případě není zvýšení vložných ztrát nijak významné. Na portu 2 se vložné ztráty zvýšily o 0,04 dB a na portu 4 o 0,18 dB.

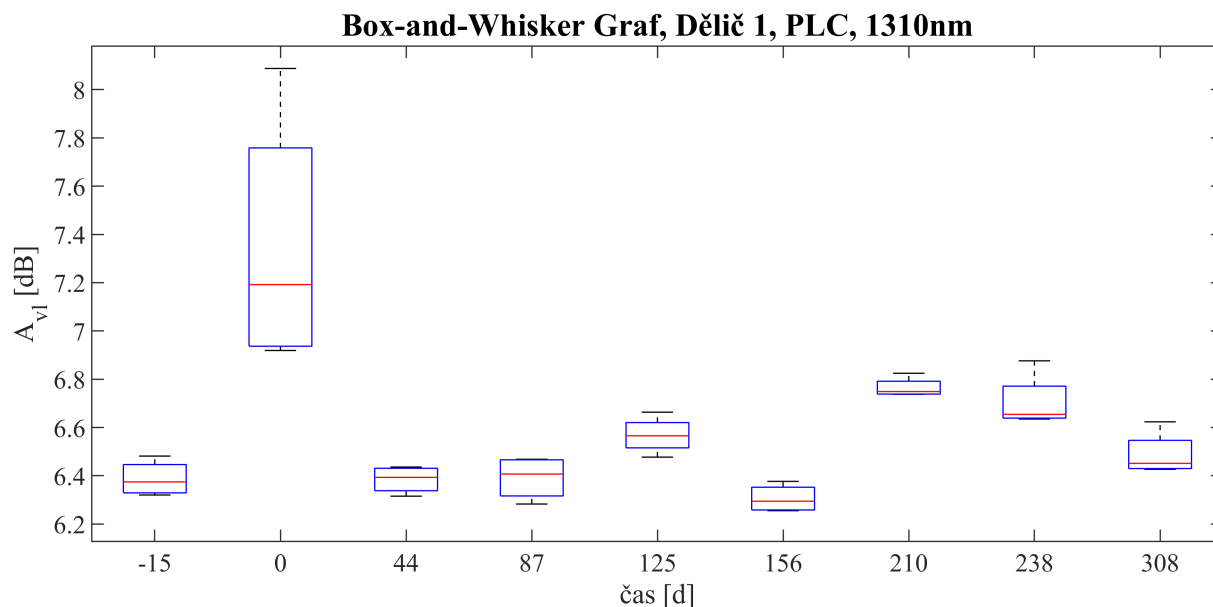


Obrázek 34: Vložné ztráty děliče 1.

Tabulka 8: Naměřené hodnoty vložných ztrát pro graf 34.

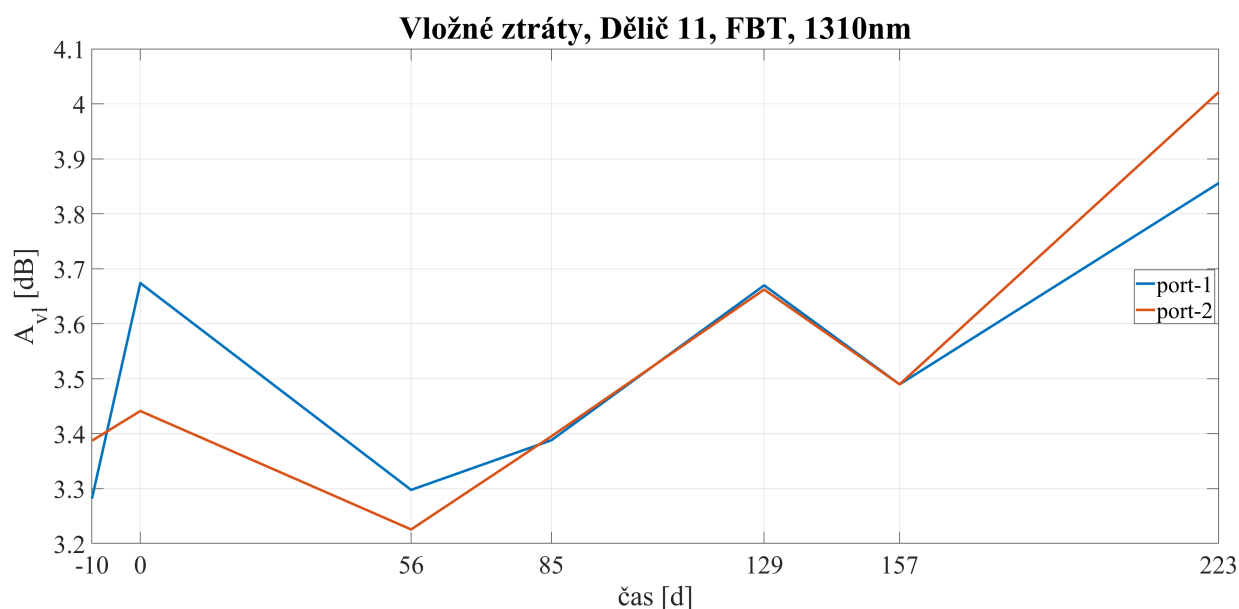
| | Port | -15. | 0 | 44 | 87 | 125 | 156 | 210 | 238 | 308 |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dělič 1 1550 nm | 1 | 6,378 | 7,259 | 6,378 | 6,518 | 6,571 | 6,396 | 6,67 | 6,544 | 6,335 |
| | 2 | 6,396 | 8,042 | 6,417 | 6,552 | 6,527 | 6,361 | 6,601 | 6,705 | 6,439 |
| | 3 | 6,274 | 6,849 | 6,321 | 6,368 | 6,47 | 6,297 | 6,631 | 6,503 | 6,254 |
| | 4 | 6,212 | 6,873 | 6,223 | 6,384 | 6,413 | 6,252 | 6,584 | 6,558 | 6,392 |

Z grafu 35 lze vidět, že gama záření má vliv na odchylku mezi naměřenými hodnotami vložných ztrát na jednotlivých výstupních větvích. Nejvyšší odchylky bylo dosaženo během ozařování, avšak gama záření nemá na tuto odchylku dlouhodobější vliv, v následujících měřeních se už odchylka dala srovnat s tou co byla naměřena během měření optických děličů před ozářením.



Obrázek 35: Odchylka měření vložných ztrát mezi výstupními větvemi pro dělič 1.

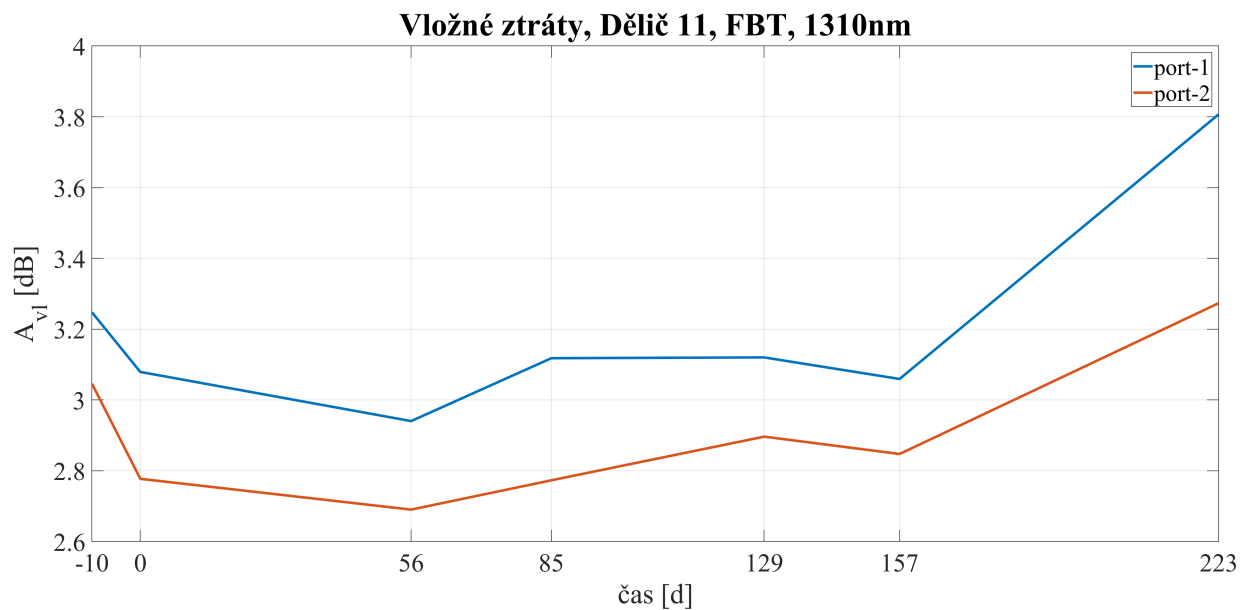
Samotné ozařování má na děliče s dělicím poměrem 1:2 menší vliv než na děliče s dělicím poměrem 1:4. Zatím co, u děličů s dělicím poměrem 1:4 vzrostly vložné ztráty při ozařování o 1 až 2 decibely, tak u 1:2 děličů je nárůst útlumu jen v řádech několika desetín decibelu. Nicméně u děličů s dělicím poměrem 1:2 se vložné ztráty s odstupem času zvyšují, zatím co u děličů 1:4 se úroveň vložných ztrát přibližuje k původní hodnotě.



Obrázek 36: Naměřené vložné ztráty děliče 11 pro vlnovou délku 1310 nm.

Z grafu 37 lze vidět, že vložné ztráty ve směru slučování na pracovní vlnové délce při ozařování

poklesly na obou portech. Na prvním portu o 0,15 dB z 3,25 na 3,1 dB a na druhém z 3 dB na 2,78 dB, tedy o 0,22 dB. Vložné ztráty při dalším měření opět nepatrně klesly na 2,9 dB na portu 1 a na 2,69 dB na portu 2. Následně vložné ztráty začaly stoupat a při posledním měření byla naměřena na prvním portu hodnota 3,81 dB, což je o 0,56 dB více než bylo naměřeno před ozářením optického děliče. Na portu 2 byla při posledním měření 223 dní po ozáření naměřena hodnota 3,27 dB, to je o 0,27 dB více než byla naměřená hodnota vložných ztrát při měření před ozářením. Chování děliče 11 při vlnové délce 1550 nm, tedy při jeho nepracovní vlnové délce, bylo při ozařování opačné, to znamená že při ozařování se hodnota vložných ztrát zvětšila. Další průběh při relaxaci byl podobný jak u pracovní vlnové délky. Nejprve nastal pokles vložných ztrát, z důsledku relaxace materiálu a následné opětovné zvýšení vložných ztrát.



Obrázek 37: Vložné ztráty ve směru slučování děliče 11.

Tabulka 9: Naměřené hodnoty vložných ztrát ztrát pro graf 36.

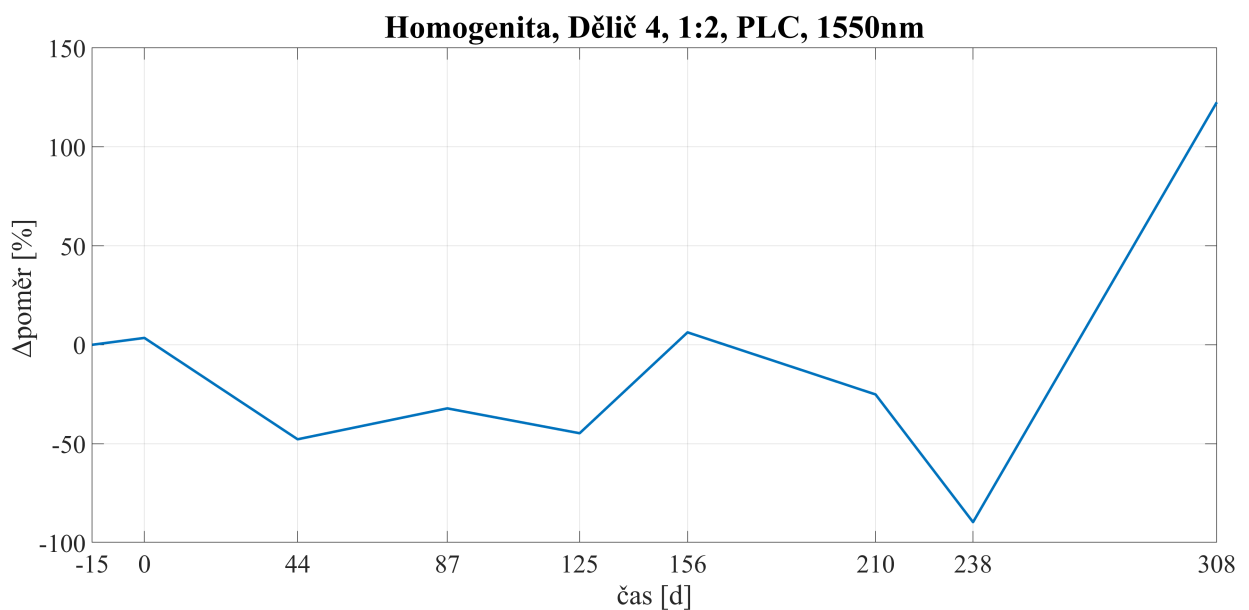
| | Port | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|---------------------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dělič 11 1310 nm | 1 | 3,033 | 3,0103 | 2,914 | 3,29 | 3,327 | 3,387 | 3,846 |
| | 2 | 2,885 | 2,745 | 2,734 | 3,062 | 3,113 | 2,975 | 3,363 |

Tabulka 10: Naměřené hodnoty vložných ztrát ztrát ve směru slučování pro graf 37.

| | Port | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|---------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Dělič 11 1310 nm | 1 | 3,248 | 3,079 | 2,94 | 3,118 | 3,121 | 3,059 | 3,807 |
| | 2 | 3,046 | 2,777 | 2,69 | 2,773 | 2,896 | 2,847 | 3,274 |

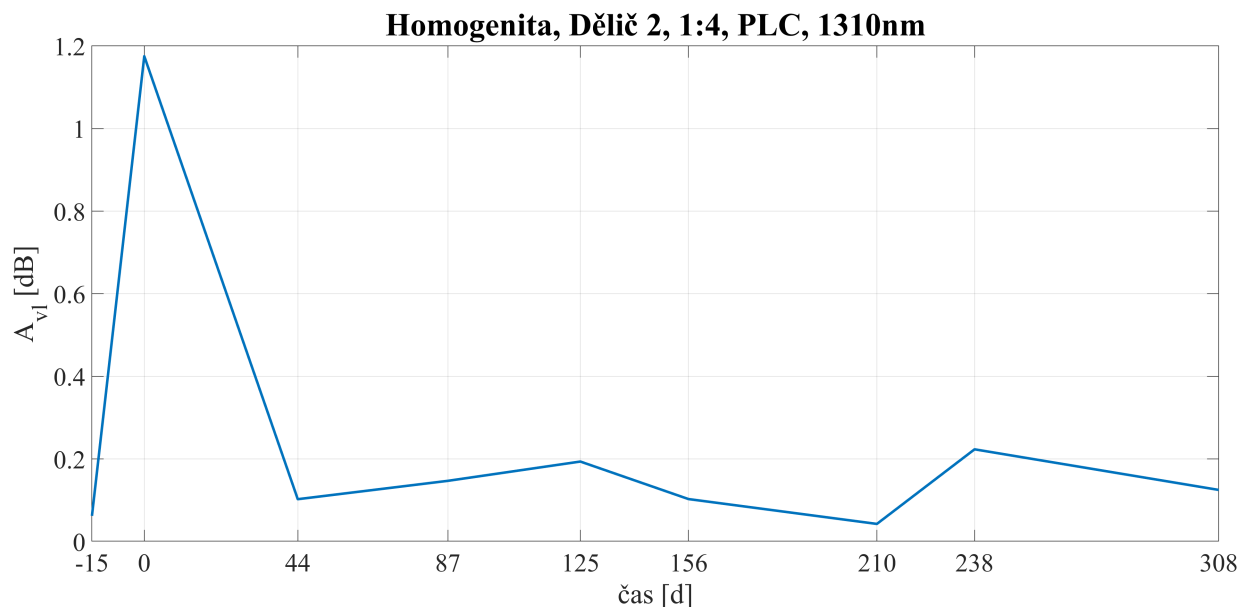
8.4 Vliv záření na homogenitu

Gama záření mělo u většiny děličů jen minimální vliv na homogenitu během ozáření. Homogenita děličů se měnila spíše s postupem času. V grafu 38 můžeme vidět změnu homogenity u optického děliče 4. Naměřené hodnoty homogenity se pohybovaly v rozmezí setin až několika desetin dB, z tohoto důvodu jsem se v následujícím grafu rozhodl místo v decibelech vyjádřit změnu mezi jednotlivými měřeními v procentech. Při prvním měření byla naměřena hodnota nehomogenity 0,14 dB. Tato nehomogenita pak dále stoupla vlivem záření o 0,01 dB, což znamenalo 3% nárůst od původní hodnoty. Nehomogenita pak dále stoupala a klesala až byla při posledním měření 308 dní po ozáření naměřena hodnota 0,3 dB, což je o 122,5% více než při prvním měření před ozářením.



Obrázek 38: Naměřené hodnoty homogenity děliče 4.

Z grafu 39 je vidět, že při ozáření optického děliče došlo k velkému zvýšení nehomogenity. Následující měření, tedy 44 dní po ozáření, se homogenita vrátila na původní hodnotu před ozářením. Další měření na druhém děliči neukázaly žádnou významnější změnu.

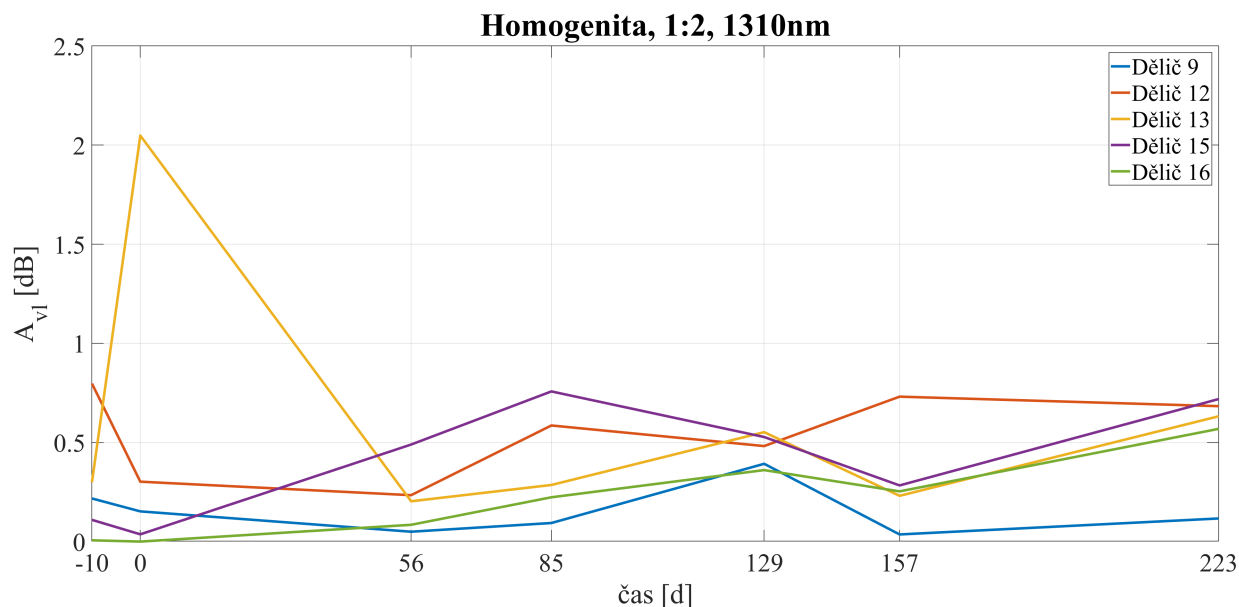


Obrázek 39: Naměřené hodnoty homogenity děliče 2.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty homogenity pro grafy 38 a 39.

| | λ | -15. | 0 | 44 | 87 | 125 | 156 | 210 | 238 | 308 |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Dělič 2 | 1310 nm | 0,136 | 0,99 | 0,103 | 0,124 | 0,155 | 0,074 | 0,035 | 0,15 | 0,163 |
| Dělič 4 | 1550 nm | 0,139 | 0,144 | 0,073 | 0,094 | 0,077 | 0,147 | 0,104 | 0,0144 | 0,309 |

V prvním měření jsem očekával nejnižší hodnoty z provedených měření. Očekával jsem že gama záření bude mít na homogenitu ryze negativní vliv. Tento jev však nenastal vždy. Jak můžeme vidět v grafu 40 u děliče 9, 12, 15 a 16 došlo k poklesu nehomogenity ve směru slučování optického výkonu při ozařování. U děliče 16 byl dokonce při ozařování naměřen na obou výstupních větvích stejný optický výkon, to znamená že se homogenita rovnala 0. S postupem dalších měření se homogenita jednotlivých děličů začala opět blížit k hodnotě, která byla naměřena při prvním měření. Na optickém děliči 13, bylo naměřeno podobné chování jako u ostatních děličů zobrazených v grafu, s tím rozdílem, že při ozařování došlo k výraznému zvýšení nehomogenity.



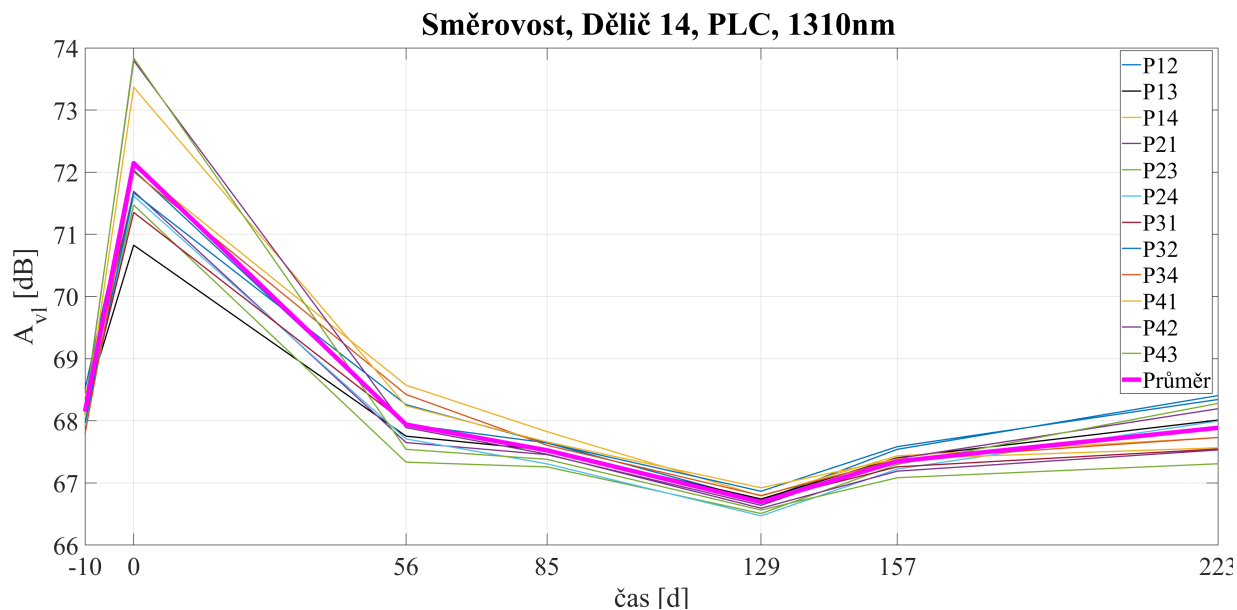
Obrázek 40: Naměřené hodnoty homogenity ve směru slučování děliče 14.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty homogenity pro graf 40.

| | λ | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|---------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Dělč 9 | 1310 nm | 0,105 | 0,038 | 0,072 | 0,007 | 0,008 | 0 | 0,165 |
| Dělč 12 | 1310 nm | 0,249 | 0,378 | 0,367 | 0,421 | 0,441 | 0,553 | 0,688 |
| Dělč 13 | 1310 nm | 0,085 | 0,233 | 0,184 | 0,235 | 0,111 | 0,043 | 0,325 |
| Dělč 15 | 1310 nm | 0,547 | 0,325 | 0,308 | 0,122 | 0,029 | 0,022 | 0,635 |
| Dělč 16 | 1310 nm | 0,201 | 0 | 0,094 | 0,061 | 0,072 | 0,136 | 0,337 |

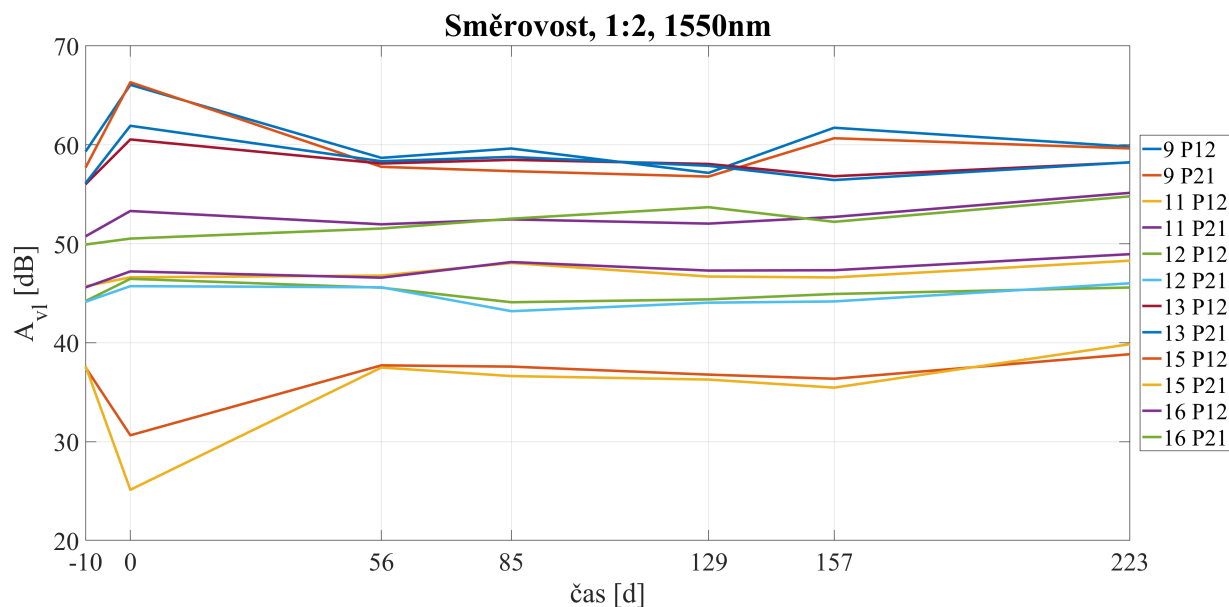
8.5 Vliv záření na směrovost

Hodnota směrovosti u většiny děličů, vlivem záření vzrostla. Čím větší útlum má dělič mezi výstupními větvemi, tím méně světla se dostane i na další výstupy. Dá se tedy říct že gama záření má na směrovost spíše pozitivní vliv. U většiny děličů byl zjištěn podobný průběh změn směrovosti. Při ozařování byl zaznamenán největší nárůst útlumu. Tato hodnota nadále začala klesat až do třetího až čtvrtého měření po ozáření, kdy začala opět mírně stoupat. Na grafu 41 je znázorněn dlouhodobý vliv na směrovost optického děliče číslo 14. Průměrná hodnota směrovosti nového neozařeného děliče 14 je 68,1 dB, která během ozařování vzrostla o 4 dB na 72,1 dB. Z důvodu následné relaxace materiálu průměrná hodnota útlumu klesla o 4,2 dB na 67,9 dB. Pokles útlumu pokračoval až do měření 129 dní po ozáření, kdy byla průměrná hodnota směrovosti 66,7 dB. Ve čtvrtém a pátém měření průměrná hodnota směrovosti mírně rostla až na hodnotu 67,9 dB, což je jen o 0,2 dB méně než počáteční průměrná hodnota směrovosti před ozářením.



Obrázek 41: Naměřené hodnoty směrovosti pro dělič 14.

V grafu 42 jsou zobrazeny změny směrovosti optických děličů s dělicím poměrem 1:2. U všech děličů došlo ke zvýšení útlumu během ozařování, až na dělič 15, u kterého byl naměřen pokles útlumu způsobený tím, že dělič má pracovní vlnovou délku 1310 nm. S odstupem času se u děličů směrovost přiblížila své původní hodnotě.

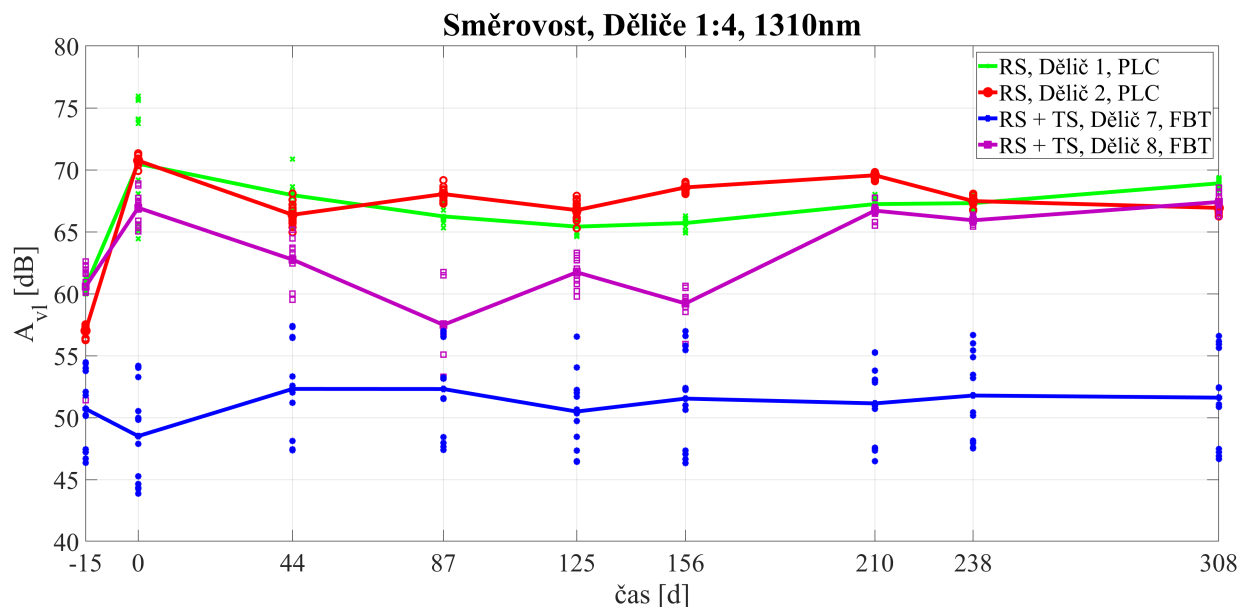


Obrázek 42: Naměřené hodnoty směrovosti pro děliče 9, 11, 12, 13, 15, a 16.

Tabulka 13: Naměřené hodnoty směrovosti pro grafy 41 a 42.

| | Port | -10 | 0 | 56 | 85 | 129 | 157 | 223 |
|---------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Dělič 14 1310 nm | P12 | 68,513 | 72,034 | 67,944 | 67,645 | 66,713 | 67,542 | 68,407 |
| | P13 | 68,252 | 70,826 | 67,753 | 67,526 | 66,742 | 67,405 | 68,012 |
| | P14 | 68,378 | 72,089 | 68,574 | 67,826 | 66,789 | 67,436 | 67,731 |
| | P21 | 68,274 | 71,693 | 67,650 | 67,456 | 66,640 | 67,393 | 68,195 |
| | P23 | 68,119 | 71,472 | 67,335 | 67,258 | 66,509 | 67,298 | 68,281 |
| | P24 | 67,922 | 71,618 | 67,708 | 67,308 | 66,471 | 67,223 | 67,997 |
| | P31 | 68,098 | 71,353 | 67,955 | 67,528 | 66,707 | 67,259 | 67,547 |
| | P32 | 67,965 | 71,668 | 68,260 | 67,641 | 66,867 | 67,585 | 68,344 |
| | P34 | 67,793 | 72,007 | 68,425 | 67,607 | 66,798 | 67,375 | 67,733 |
| | P41 | 68,047 | 73,366 | 68,242 | 67,660 | 66,922 | 67,387 | 67,566 |
| | P42 | 68,226 | 73,795 | 67,890 | 67,464 | 66,593 | 67,190 | 67,531 |
| | P43 | 68,187 | 73,836 | 67,541 | 67,380 | 66,564 | 67,084 | 67,309 |
| Dělič 9 1550 nm | P12 | 59,320 | 57,704 | 66,068 | 66,327 | 58,685 | 57,781 | 59,632 |
| | P21 | 57,344 | 57,169 | 56,797 | 61,730 | 60,670 | 59,814 | 59,640 |
| Dělič 11 1550 nm | P12 | 45,711 | 45,599 | 46,617 | 47,213 | 46,792 | 46,580 | 48,062 |
| | P21 | 48,160 | 46,696 | 47,296 | 46,602 | 47,333 | 48,299 | 48,955 |
| Dělič 12 1550 nm | P12 | 44,213 | 44,142 | 46,463 | 45,723 | 45,567 | 45,608 | 44,095 |
| | P21 | 43,192 | 44,386 | 44,053 | 44,932 | 44,177 | 45,585 | 46,014 |
| Dělič 13 1550 nm | P12 | 56,017 | 56,127 | 60,547 | 61,928 | 58,116 | 58,346 | 58,484 |
| | P21 | 58,783 | 58,069 | 57,881 | 56,831 | 56,444 | 58,226 | 58,241 |
| Dělič 15 1550 nm | P12 | 37,514 | 37,643 | 30,654 | 25,147 | 37,719 | 37,498 | 37,592 |
| | P21 | 36,635 | 36,783 | 36,284 | 36,366 | 35,468 | 38,846 | 39,860 |
| Dělič 16 1550 nm | P12 | 50,759 | 49,928 | 53,317 | 50,529 | 51,972 | 51,547 | 52,469 |
| | P21 | 52,539 | 52,042 | 53,701 | 52,718 | 52,223 | 55,152 | 54,798 |

V grafu 43 je vidět, že po ozáření optických děličů útlum vzrostl. U děliče 7 při ozařování hodnota útlumu klesla z 50,7 dB na 48,5 dB, z důvodu že dělič 7 má jako pracovní vlnovou délku 1550 nm. Například u děliče 1 byla počáteční naměřená průměrná hodnota směrovosti 60,6 dB a při ozáření vzrostla až na 70,5 dB. Následně po 44 dnech, kdy následovalo první měření po ozáření, tato průměrná hodnota klesla na 68 dB. Průměrná hodnota směrovosti následně dále klesala až do měření, které proběhlo 156 den po ozáření kdy útlum začal opět stoupat až na hodnotu 68,9 dB. U ostatních děličů byl zaznamenán podobný průběh.



Obrázek 43: Srovnání hodnoty směrovosti děličů s dělicím poměrem 1:4.

Tabulka 14: Vypočtené hodnoty průměrné směrovosti pro graf 43.

| Dělič | -15. | 0 | 44 | 87 | 125 | 156 | 210 | 238 | 308 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 60,559 | 70,499 | 71,710 | 66,247 | 65,420 | 65,711 | 67,237 | 67,315 | 68,916 |
| 2 | 57,018 | 70,748 | 66,377 | 68,048 | 66,751 | 68,586 | 69,562 | 67,482 | 766,933 |
| 7 | 50,714 | 48,513 | 52,322 | 52,313 | 50,497 | 51,541 | 51,154 | 51,788 | 51,617 |
| 8 | 60,571 | 66,941 | 62,761 | 57,494 | 61,737 | 59,215 | 66,710 | 65,931 | 67,410 |

Gama záření má vliv i na odchylku mezi hodnotami směrovosti na jednotlivých výstupních větvích. Na grafu 44 si můžeme všimnout, že byla odchylka směrovosti optického děliče nejmenší před ozářením. Při ozáření byla odchylka výrazně větších než u ostatních měření. Následně tato odchylka dále klesala s postupnou relaxací materiálu. Měření které proběhlo 125 dní po ozáření bylo první měření, ve kterém byla poprvé použita stínící krabice. Vlivem této krabice se odchylka mezi směrovostmi na výstupních větvích zmenšila.



Obrázek 44: Odchylka jednotlivých hodnot směrovosti pro dělič 1.

8.6 Zhodnocení měření

8.6.1 Vazební poměr

Z provedených měření se potvrdilo tvrzení, že i když se jedná o symetrické optické děliče, tak stejně není signál rovnoměrně rozdělen mezi výstupy. U optických děličů vyrobených technologií FBT bylo vyzorováno, že vlivem gama záření došlo ke zlepšení nebo mírnému zhoršení vazebního poměru u děličů 1:4, stejně i u většiny děličů s dělicím poměrem 1:2. Výjimkou byl dělič 12 kdy došlo, během dlouhodobého měření, ke zhoršení vazebního poměru o 3,64%. Odchylka vazebního poměru od průměru tedy činila 6,15%, tato hodnota už má významný vliv na správnou funkčnost děliče. Během měření došlo ke zhoršení vazebního poměru při ozařování a k jeho následnému zlepšení během relaxace materiálu. Vliv gama záření na PLC děliče se v některých případech lišil, například na děliče 1 a 2 mělo největší vliv samotné ozařování když se rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou vazebního poměru, pohyboval okolo 6%. Během následné relaxace materiálu se hodnoty vazebního poměru opět přiblížily těm původním. Jak je znázorněno v grafu 26, tak na dělič 10 mělo gama záření spíše opačný vliv. Při ozařování došlo jen k nepatrnému zhoršení a až následnou relaxací se rozdíl mezi vazebními poměry zvětšoval.

8.6.2 Celkové ztráty

Podobně jako u ostatních přenosových vlastností optických děličů, tak i celkové ztráty jsou nejvíce ovlivněny během ozařování děliče. Největší nárůst útlumu při ozařování nastal u optického děliče 1 a 15 a to přibližně o 1 dB. U ostatních děličů byl nárůst v řádu desetin decibelu. Nárůst celkových ztrát během relaxace materiálu, oproti původní hodnotě celkových ztrát naměřených

před ozáření optických děličů, je poměrně zanedbatelný, jedná se o nárůst několika setin až desetin decibelu. Stejně tak pokles celkových ztrát naměřených, na novém optickém děliči oproti celkovým ztrátám naměřeným při posledním měření, je nevýrazný. Nejvyšší hodnota zlepšení celkových ztrát byla naměřena u děliče 8 a to o 0,2 dB.

8.6.3 Vložné ztráty

U optických děličů došlo k nejvýraznějšímu nárůstu vložných ztrát při ozařování, kdy se útlum zvýšil o 1 až 2 dB. Následnou relaxací materiálu se vložné ztráty zase zpět přiblížily hodnotě naměřené před ozařováním optického děliče. Vložné ztráty se u PLC a FBT děličů moc nelišily, vždy došlo k nárůstu útlumu při ozařování, po kterém následoval pokles. Vystavení optických děličů těmto hodnotám záření má výrazný vliv na optické děliče během působení záření, avšak z dlouhodobě je vliv takovéto dávky záření zanedbatelný.

8.6.4 Homogenita

U většiny děličů byl nárůst nehomogenity vlivem gama záření jen v řádech setin až několika desetin dB, s výjimkou děliče 13, když při ozáření hodnota nehomogenity stoupla z 0,3 dB o 1,7 dB na hodnotu 3 dB. Optické děliče s dělicím poměrem 1:2 vyrobené technologií PLC se chovaly podobně na obou vlnových délkách. Děliče s dělicím poměrem 1:4 vykazovaly různé chování podle dávky radiace kterou, absorbovaly. Děliče z první sady, které absorbovaly dávku 50kGy, byly nejvíce ovlivněny při ozařování. S odstupem času se homogenita opět přiblížila původní hodnotě. Druhá sada děličů, která byla vystavena dávce záření 60 kGy, vykazovala nejvyšší změny homogenity až s odstupem času. Děliče vyrobené technologií FBT pracovaly na každé vlnové délce odlišně. Na FBT děličích s dělicím poměrem, které byly měřeny na jejich pracovní vlnové délce došlo vlivem ozáření k nárůstu nehomogenity. V opačném případě kdy byly děliče měřeny na nepracovní vlnové délce, došlo k poklesu nehomogenity. U testovaných FBT děličů došlo spíše ke změnám homogenity během měření následujících po ozáření, než při samotném ozařování.

8.6.5 Směrovost

U optických děličů vystavených gama záření došlo ke zvýšení nebo zanedbatelnému snížení směrovosti. U optických děličů vyrobených PLC technologií byly výsledky pro obě vlnové délky podobné. Stejné chování bylo vypořádováno jak pro děliče s dělicím poměrem 1:4 tak 1:2. Ve většině případů došlo k výraznému zvýšení směrovosti při ozařování a následnému poklesu při dlouhodobém pozorování. U děličů 1, 2, 3, 4, 13, došlo k navýšení směrovosti až o 10 dB. U zbývajících tří PLC děličů byla při posledním měření zjištěna hodnota přibližně stejná, jako hodnota směrovosti děličů před ozáření. Optické děliče vyrobené technologií FBT měly pro každou vlnovou délku jiné výsledky. Při měření těchto děličů na jejich pracovní vlnové délce, byly zjištěny podobné výsledky jako u PLC děličů. Při měření směrovosti na nepracovní vlnové

délce, došlo při ozáření k poklesu útlumu. Zaznamenali jsme tedy u děličů 7, 15 a 16 opačné chování při ozařování, jako při měření na jejich pracovní vlnové délce. Ve většině případů došlo ke zvýšení hodnoty směrovosti, jak při ozařování, tak i během dlouhodobého pozorování. Gama záření, v takové míře, jaké byly vystaveny tyto optické děliče, nemá významný vliv na zhoršení směrovosti.

9 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit dlouhodobý vliv gama záření na přenosové parametry optických děličů používaných v telekomunikačních nebo senzorických sítích. Včetně teoretického rozboru tohoto pasivního optického komponentu.

Práce je rozdělena do čtyř hlavních částí. Jedná se o část teoretickou (kapitola 2), kde byly popsány pasivní optické komponenty a teoretický rozbor metod měření pasivních prvků optické sítě. V druhé části (kapitola 5) se nachází rozbor postupu ozařování a měření optických děličů. V třetí části (kapitola 7) jsou shrnuty výsledky dalších prací na toto téma. Ve čtvrté části (kapitola 8) jsou výsledky měření a vyhodnocení parametrů optických děličů po ozáření.

Gama záření může výrazně ovlivnit funkci optického děliče. Z dlouhodobého zkoumání bylo zjištěno, že vliv může být pozitivní i negativní. Jeden z příkladů kdy mělo pozitivní vliv bylo při zkoumání směrovosti. Tento parametr udává izolační schopnost pasivních optických komponent izolovat parazitní projevy přenášeného optického záření. U tohoto parametru platí, čím vyšší tím se lépe izolační vlastnost projevuje. Směrovost u optických děličů se běžně pohybuje mezi 50 a 60 dB. V našem případě se u většiny děličů zvýšila hodnota směrovosti, nicméně se i zhoršila odchylka mezi hodnotami na jednotlivých výstupních portech. Dominantní projev gama záření se projevoval při samotném ozařovacím procesu. S časovým odstupem se postupně parametry přibližovaly počáteční hodnotě. Jev byl způsoben relaxací jednotlivých atomů materiálu optického vlnovodu do původního stavu.

V této práci byly zkoumány vlivy gama záření na PLC a FBT děliče s dělicím poměrem 1:2 a 1:4 na dvou vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Zatímco PLC děliče měly ve většině případů podobné výsledky na obou vlnových délkách, což odpovídá širokospektrálnímu použití těchto prvků. Naopak určité výsledky naměřené na FBT děličích se pro každou vlnovou délku lišily. Tyto děliče měli pro každou vlnovou délku nepředvídatelný průběh změn. To bylo způsobeno tím, že byly vyrobeny a přizpůsobeny na jednu konkrétní pracovní vlnovou délku. Toto chování se potvrdilo, například u děliče 5 při měření celkových ztrát. Při měření během ozařování na jeho pracovní vlnové délce došlo ke zvýšení útlumu a následně vlivem relaxace materiálu k opětovnému poklesu. Při stejném měření na jeho nepracovní vlnové délce byl trend opačný. Nejprve došlo ke snížení celkových ztrát vlivem záření, nicméně s odstupem času začaly celkové ztráty opět stoupat a při posledním měření byla hodnota útlumu o přibližně 0,2 dB vyšší než před ozářením. U zmiňovaných výrobních technologií nastaly i rozdíly ve vlivu záření na přenosové parametry. U PLC děličů se nejvíce zvyšoval útlum při působení gama záření. Kdežto přenosové parametry FBT děličů byly nejvíce ovlivněny během měření, která probíhala až po ozáření.

U většiny děličů došlo jen ke krátkodobému zhoršení přenosových parametrů v důsledku ozařování. Došlo jen k jednomu výraznějšímu poškození optického děliče, a to konkrétně vazebního poměru děliče 12. Vazební poměr se na portu-2 zhoršil vlivem záření z 52,51% o 3,64% na hodnotu 56,15%. Vazební poměr je tedy zhruba 44/56, což už je mimo toleranci. Z naměřených

hodnot, proto vyplývá že dávka 50 kGy a 60 kGy nemá dlouhodobě významný vliv na přenosové parametry optických děličů.

Během měření bakalářské práce se projevovala v jednotlivých měřících iteracích chyba měření, která je do procesu vnášena neustálým spojováním a rozpojováním konektorů optických děličů. Potřebný objem dat, pro správné statistické zhodnocení vývoje parametrů, vyžadoval minimálně deset po sobě jdoucích nezávislých měření. To v extrémních případech znamenalo i více jak 8 hodin měření. Z toho důvodu navrhuji pro budoucí práce tohoto charakteru využít optické pracoviště s optickými přepínači, které by automaticky přepínaly mezi porty optických děličů, světelným zdrojem a detektorem. Tento způsob by výrazně zefektivnil měření komponent s libovolným počtem vstupních i výstupních portů.

Literatura

- [1] GHATAK, A. - THYAGARAJAN, K. *Introduction to fiber optics*. New York: Cambridge University Press 1998. 562 s. [cit. 2021-02-03]. ISBN 0-521-57785-3
- [2] KUCHARSKI, M - DUBSKÝ, P *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*, MIKROKOM, Praha, 1998. [cit. 2021-02-03]
- [3] LAM, F. Cedric *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. USA: Elsevier, 2007, [cit. 2021-02-03]. ISBN 987-0-12-373853-0
- [4] OKAMOTO, K. *Planar Lightwave Circuits (PLCs)*. PRATI, Giancarlo, ed. Photonic Networks. London: Springer London, 1997, 1997, s. 118-132. [cit. 2021-02-03]. DOI: 10.1007/978-1-4471-0979-2-11. ISBN 978-1-4471-1248-8
- [5] *How Do Different Fiber Optic Couplers Work* [online]. [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/how-do-different-fiber-optic-couplers-work.html>
- [6] ŠIŠKA, P. a kolektiv *Optoelektronika*. Skripta. VŠB FEI, Ostrava.
- [7] ČSN EN 61300-3-4 ed. 2 *Spojovací prvky a pasivní součástky vláknové optiky - Základní zkušební a měřicí postupy - Část 3-4: Zkoušení a měření - Útlum*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 28s. Třídící znak 35 9213
- [8] ULLMANN, V. *Jaderná a radiační fyzika*. 1. vydání. Ostravská universita v Ostravě, Fakulta zdravotnických studií, 2009. 173 s. ISBN 978-80-7368-669-7
- [9] SAHA, Gopal, B. *Physics and radiobiology of Nuclear Medicine*. 3. vydání. New York: Springer Science+Business Media, 2006. 320 s. ISBN-10: 0-387-30754-0 , ISBN-13: 978-0387- 30754-1 , e-ISBN 0-387-30754-0
- [10] FILKA, M. *Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [11] KAKUTA Tsunemi, SHIKAMA Tatsuo, NARUI Minoru, SAGAWA, Tsutomu. Behavior of optical fibers under heavy irradiation. In: *Fusion Engineering and Design*. 1998. s. 201-205. ISSN 0920-3796
- [12] SHUAI, Ci-jun, Ji-an DUAN a Jue ZHONG. Effect of technological parameters on optical performance of fiber coupler. *Journal of Central South University of Technology* [online]. 2007, 14(3), 370-373 [cit. 2021-04-07]. ISSN 1005-9784. Dostupné z: doi:10.1007/s11771-007-0073-5
- [13] JINGMING SONG, Jingming Song, Jianhua Guo JIANHUA GUO, Xueqin Wang XUEQIN WANG a Jing Jin JING JIN. Temperature dependence of radiation-induced attenuation of

- optical fibers. *Chinese Optics Letters* [online]. 2012, 10(11), 110604-110606 [cit. 2021-04-07]. ISSN 1671-7694. Dostupné z: doi:10.3788/COL201210.110604
- [14] DERIKSON, Dennis. *Fiber Optic Test and Measurement*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. ISBN 0135343305
- [15] BEDNAREK, Lukas, Ondrej MARCINKA, Frantisek PERECAR, Martin PAPES, Lukas HAJEK, Jan NEDOMA a Vladimir VASINEK. *The aging process of optical couplers by gamma irradiation* [online]. In: . 26. 8. 2015, s. 10 [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2187044
- [16] PERECAR, F., O. MARCINKA, L. BEDNAREK, et al. *The impacts of ageing effects due to radiation burden on optical fiber couplers* [online]. In: . 26. 8. 2015, [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2187517
- [17] BEDNAREK, Lukas, Lukas HAJEK, Ales VANDERKA, Jan NEDOMA, Marcel FAJKUS, Ondrej ZBORIL a Vladimir VASINEK. *The influence of thermal aging on the optical coupler* [online]. In: . 7. 9. 2016, [cit. 2021-4-28]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2236294
- [18] *Variable Fiber Optical Attenuators, Single Mode* [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6161
- [19] HAWN, David P., Christian M. PETRIE, Thomas E. BLUE a Wolfgang WINDL. In-situ gamma radiation induced attenuation in silica optical fibers heated up to 600°C. *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 2013, 379, 192-200 [cit. 2021-4-29]. ISSN 00223093. Dostupné z: doi:10.1016/j.jnoncrysol.2013.08.013
- [20] GILL, K., R. GRABIT, M. PERSELLO, G. STEFANINI a F. VASEY. Gamma and neutron radiation damage studies of optical fibres. *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 1997, 216, 129-134 [cit. 2021-4-29]. ISSN 00223093. Dostupné z: doi:10.1016/S0022-3093(97)00179-8
- [21] WILLIAMS, Glen M., Barbara M. WRIGHT, W. D. MACK, E. J. FRIEBELE a M. John MATTHEWSON. Projecting the performance of erbium-doped fiber devices in a space radiation environment. In: *Optical Fiber Reliability and Testing*. 3848. Boston: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1999, s. 271-280. DOI: 10.1117/12.372781
- [22] AMEMIYA, T. a Y. NAKANO. Single Mode Operation of 1.5- μ m Waveguide Optical Isolators Based on the Nonreciprocal-loss Phenomenon. YOUNG, Ki, ed. *Advances in Optical and Photonic Devices* [online]. InTech, 2010, 2010-01-01 [cit. 2021-4-30]. ISBN 978-953-7619-76-3. Dostupné z: doi:10.5772/7143

A Seznam příloh

1. Grafy
2. Tabulky naměřených hodnot